

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DE UN CLARIFICADOR SECUNDARIO

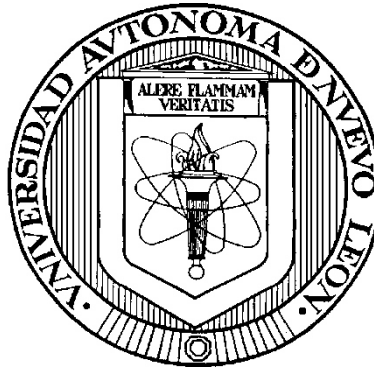
**POR
OMAR ANTONIO CARDIEL VÁZQUEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

SEPTIEMBRE, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DE UN CLARIFICADOR SECUNDARIO

Por

OMAR ANTONIO CARDIEL VÁZQUEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientación en

Ingeniería Ambiental

Septiembre 2015



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería civil
Presente.-

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente le informo que el **Ing. Omar Antonio Cardiel Vázquez**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, ha concluido su trabajo de Tesis titulado **"Calibración hidráulica de un clarificador secundario"** la cual fue realizada bajo la Dirección de su servidor, por lo que no existe ningún inconveniente en atender la solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución. Por lo tanto, agradeceré se informe al Ing. Cardiel Vázquez para que inicie los trámites correspondientes.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
"Alere Flammam Veritatis"
Cd. Universitaria a 26 de agosto de 2015

Dr. Jimmy Luis Loaiza Navia
Director de tesis



*"Educación de clase mundial,
un compromiso social"*

FO-SDP-01

Ave. Universidad S/N, Cd. Universitaria, Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tel.: (01-81) 1442 4400 Ext.: 4447 y 4448
Conm.: (01-81) 8329 4000 Ext.: 7216 y 7234
<http://fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería civil
Presente.-

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente le informo que el **Ing. Omar Antonio Cardiel Vázquez**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, ha concluido su trabajo de Tesis titulado **"Calibración hidráulica de un clarificador secundario"** la cual fue realizada bajo la co-dirección de su servidor, por lo que no existe ningún inconveniente en atender la solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución. Por lo tanto, agradeceré se informe al Ing. Cardiel Vázquez para que inicie los trámites correspondientes.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
"Alere Flammam Veritatis"
Cd. Universitaria a 26 de agosto de 2015

Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián
Co-director de tesis



*"Educación de clase mundial,
un compromiso social"*

FO-SDP-01

Ave. Universidad S/N, Cd. Universitaria, Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tel.: (01-81) 1442 4400 Ext.: 4447 y 4448
Conm.: (01-81) 8329 4000 Ext.: 7216 y 7234
<http://fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería civil
Presente.-

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente le informo que el **Ing. Omar Antonio Cardiel Vázquez**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, ha concluido su trabajo de Tesis titulado **"Calibración hidráulica de un clarificador secundario"** la cual soy evaluador del proyecto, por lo que no existe ningún inconveniente en atender la solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución. Por lo tanto, agradeceré se informe al Ing. Cardiel Vázquez para que inicie los trámites correspondientes.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
"Alere Flammam Veritatis"
Cd. Universitaria a 26 de agosto de 2015

M.C. Edgar Amauri Arteaga Balderas
Evaluador



*"Educación de clase mundial,
un compromiso social"*

FO-SDP-01

Ave. Universidad S/N, Cd. Universitaria, Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tel.: (01-81) 1442 4400 Ext.: 4447 y 4448
Conm.: (01-81) 8329 4000 Ext.: 7216 y 7234
<http://fic.uanl.mx>

“CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DE UN CLARIFICADOR SECUNDARIO”

APROBACIÓN DE LA TESIS

**DR. JIMMY LUIS LOAIZA NAVIA
DIRECTOR DE TESIS**

**DR. VÍCTOR HUGO GUERRA COBIÁN
CO-DIRECTOR DE TESIS**

**M.C. EDGAR AMAURI ARTEAGA
EVALUADOR DE LA TESIS**

**DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

RESUMEN

Omar Antonio Cardiel Vázquez

Fecha de graduación: Septiembre,
2015

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DE UN CLARIFICADOR SECUNDARIO

Número de páginas: 87

**Candidato para el grado de Maestría
en Ciencias con orientación en
Ingeniería Ambiental**

Área de estudio: Ingeniería Ambiental

Propósito y método del estudio: En este trabajo se presenta el estudio de la hidrodinámica de un clarificador secundario de una planta tratadora de aguas residuales con la metodología “estímulo-respuesta”. El estímulo consistió en añadir un pulso de trazador, en este caso Rodamina wt, en el afluente del clarificador. Por otro lado, la respuesta consistió en tomar muestras del efluente para encontrar la concentración del trazador y determinar la curva de distribución de los tiempos de residencia. Se implementó el modelo “tanques en serie” para establecer una comparación entre el diseño y lo que se presenta en el clarificador secundario.

Se encontró que éste trabaja bajo condiciones eficientes respecto a diseño y que el modelo implementado respalda lo encontrado debido a los parámetros establecidos.

Conclusiones: La metodología utilizada resultó adecuada conforme a los objetivos planteados en la investigación, se determinó que el tanque trabaja en condiciones óptimas respaldándolo con un modelo matemático. Por último se establece una metodología para la revisión del comportamiento hidráulico en clarificadores secundarios de funcionamiento similar al estudiado.

FIRMA DEL ASESOR: _____

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me otorgó para la realización de estos estudios.

A mi director y co-director de tesis, el Dr. Jimmy Luis Loaiza Navia y el Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián por su apoyo, paciencia, asesoría y consejos que me brindaron durante los dos años de trabajo en el desarrollo del tema de investigación.

Al Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez, al M.C. Adrián Ferriño Fierro y al Dr. Cesar Juárez Alvarado, autoridades de la Facultad de Ingeniería Civil, del Instituto de Ingeniería Civil y subdirección de estudios de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por el apoyo brindado en espacio y material necesario, ya que, sin su apoyo no se habría logrado.

Al M.C. Edgar Amauri Arteaga Balderas por proporcionar la Rodamina wt para el desarrollo de la experimentación.

Al Ing. Emilio Rangel Woodyar, Director de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey que me brindaron el acceso a sus instalaciones para el desarrollo de la parte experimental.

A la Química Laura Martínez García por su apoyo para la realización de la experimentación.

A la Dra. Leticia Torres Guerra y al Dr. Christian Gómez Solís del departamento Ecomateriales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil, los cuales me asesoraron y me apoyaron facilitándome el uso del equipo para la calibración y experimentación.

Al mis compañeros del departamento Centro Internacional del Agua así como mis compañeros de generación en la maestría que me brindaron su apoyo en lo posible durante el desarrollo de la investigación.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres José Antonio Cardiel Macías y San Juana Laura Vázquez Barrón por apoyarme en las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, por la educación y los valores que me inculcaron y por siempre estar presentes para ayudarme. También a mis hermanos José Alejandro y Andrés Antonio Cardiel Vázquez los cuales me apoyaron y me tuvieron paciencia durante el transcurso de la maestría.

DEDICATORIA

A mis padres

José Antonio Cardiel Macías y San Juana Laura Vázquez Barrón

Por todos sus sacrificios.

A mis hermanos

José Alejandro y Andrés Antonio

Por su gran apoyo

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 Aporte Científico-Técnico	10
1.3 Justificación.....	11
1.4 Hipótesis	12
1.5 Objetivos	12
1.5.1 Objetivo general.....	12
1.5.2 Objetivos específicos	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Tratamiento de aguas residuales, breve historia y sus fundamentos.....	14
2.2 Tratamiento secundario (lodos activados).	18
2.3 RTD “Distribución de los tiempos de residencia”.	20
2.4 Estímulo-Respuesta, trazadores y su detección.	27
2.5 Modelo Tanques en Serie	32
3. METODOLOGÍA	34
3.1 Calibración del fluorómetro	36
3.2 Pre-simulación con AQUASIM	39
3.3 Etapa experimental de campo.....	40
3.4 Etapa experimental de laboratorio	44
3.5 Procesamiento de datos	45
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL FLUORÓMETRO.....	49
4.2 RESULTADOS DE LA ESTAPA EXPERIMENTAL DE CAMPO.....	53
4.3 LABORATORIO Y GABINETE.....	55
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen bibliográfico utilizado en antecedentes.	8
Tabla 2.1. Tipos de trazadores, sistema preferente a estudiar y su método de detección (adaptada de CEPIS, 2005).....	29
Tabla 3.1. Tabla base para campaña de muestreo.....	42
Tabla 3.2. Parámetros del modelo tanques en serie.....	45
Tabla 4.1. Datos de intensidad de cada muestra.....	51
Tabla 4.2. Datos de intensidad de fotoluminiscencia medida por fluorómetro de cada muestra.	55
Tabla 4.3. Datos de concentración de cada muestra.....	56
Tabla 4.4. Resumen de la hoja de cálculo utilizada en el procedimiento para encontrar las características del clarificador secundario analizado.....	58
Tabla 4.5. Datos para el eje vertical de la curva $F(t)$	59
Tabla 4.6. Tabla de resumen de datos característicos del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.....	61
Tabla 4.7. Tabla de datos para el ajuste del modelo tanques en serie.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Curva de concentración y curva RTD (adaptada de Scott Fogler, 2004).	23
Figura 2.2 Comportamiento de la función $F(t)$, la cual siempre su máximo será la unidad al tiempo máximo de medición (adaptada de Cunill et al, 2010).	24
Figura 2.3 Diferencias entre los tipos de flujos (adaptada de Levienspiel, 2004).	24
Figura 2.4. Comportamiento típico de la RTD de un flujo con cortos circuitos (adaptada de Scott Fogler, 2004).	26
Figura 2.5. Representación gráfica del modelo “Tanques en serie” (Cunill, 2010).	32
Figura 2.6. Comportamiento del modelo “Tanques en serie” (adaptada de Scott Fogler, 2004).	33
Figura 3.1. Diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo en esta investigación.	35
Figura 3.2 Área de trabajo en el laboratorio. Diluciones a diferentes concentraciones para la calibración.	36
Figura 3.3. Fluorómetro del departamento de Ecomateriales y Energía, IIC-UANL (Marca: Agilent Technologies, modelo: Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer).	37
Figura 3.4. Imagen de la simulación con AQUASIM, se observa la interfaz del programa y la curva “concentración de trazador vs tiempo” teórica.	39
Figura 3.5. Imagen satelital de la PTAR Zuazua, enfatizando los clarificadores secundarios (Imagen generada con Google Earth Pro).	40
Figura 3.6. Punto dentro del tren de tratamiento (1) donde el líquido a tratar se separa hacia la entrada de los tanques clarificadores (2-Sur y 3-Norte).	41
Figura 3.7. Esquema general de tratamiento secundario; Punto señalado, área donde se inyecta el pulso de trazador.	41
Figura 3.8. Esquema general de tratamiento secundario; Punto donde se acumula el efluente del clarificador secundario norte.	43
Figura 4.1. Gráfico de comparación de las corridas de las muestras a diferentes concentraciones para la calibración del fluorómetro.	50
Figura 4.2. Curva de calibración.	51

Figura 4.3. Cambio en la tonalidad del efluente por la concentración de la rodamina wt, se tomó una muestra representativa de las muestras recolectadas, 16 de 95.....	53
Figura 4.4. Respuesta típica del experimento estímulo-respuesta en la modalidad de inyección en pulso (Fogler, 2004).	54
Figura 4.5. Curva “C (t)” del experimento realizado al clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.....	57
Figura 4.6. Curva de distribución de tiempos de residencia (RTD) del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.	58
Figura 4.7. Curva “F (t)” del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua..	60
Figura 4.8. Punto donde se juntan los afluentes de los clarificadores.....	62
Figura 4.9. Comportamiento del modelo de dispersión (Fogler, 2004).	63
Figura 4.10. Curvas de comparación de RTD medido y modelado.....	65
Figura 4.11. Comportamiento del modelo tanques en serie, donde: N= número de tanques en serie.....	66

NOMENCLATURA UTILIZADA

Símbolo	Descripción	Unidad
t	Tiempo	minutos
E (t)	Función de los tiempos de residencia	tiempo ^{- 1}
C (t)	Concentración de trazador	mg/m ³
F (t)	Función acumulativa	adimensional
Q	Gasto	LPS
y	Intensidad detectada en fluorómetro	a.u.
x	Concentración trazador	mg/m ³
R ²	Coeficiente de determinación	adimensional
N	Número de tanques en serie	adimensional

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en general o particularmente de una parte del tratamiento, radica en conocer los parámetros de la misma, debido a que cada PTAR es única y las características de evaluación convergen en la necesidad de mantener un control de las mismas. Ya sea que se evalúe el patrón de fraccionamiento, la cinética de producción de lodo o la hidrodinámica de los reactores en el caso de que el funcionamiento de la planta sea por lodos activados.

La necesidad de evaluar el proceso de lodos activados recae en el fundamento de establecer si la planta funciona según diseño y que esta trabaje en condiciones óptimas, con lo cual se evita un derroche de insumos tales como el uso de electricidad o generar un efluente deficientemente tratado y así generar ajustes para equilibrar el funcionamiento de la planta.

Todo esto influye en la toma de decisiones en el diseño para otras plantas, debido a que de este tipo de investigaciones, sobresalen parámetros hidráulicos que no se tomaban en cuenta y solo así poder ir afinando los mismos a la hora de diseñar una PTAR.

La planta de tratamiento (PTAR) objeto de este estudio se encuentra ubicada en el municipio de Zuazua, Nuevo León. Zuazua es el municipio con mayor crecimiento entre el censo de 2000 y el censo de 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), teniendo una tasa de crecimiento promedio anual de 23.9%, respecto al 2.9% en el estado de Nuevo León. Esto impacta en el desarrollo de la población, la cual no fue de esperarse por parte de los diseñadores de la planta actual y que influye en toda PTAR al verse incrementado el gasto de entrada a la planta (INEGI, 2010). La PTAR Zuazua fue construida en el año 2010 con capacidad de 100 l/s en su tren de tratamiento, la cual en el año 2014 empezó una etapa de ampliación para amortizar los incrementos en los afluentes.

La presente investigación analiza la hidrodinámica de un clarificador secundario en PTAR del municipio de Zuazua, N.L. Consistió en aplicar la metodología “estímulo-respuesta” para determinar el tiempo de residencia y con esto evaluar factores de tipo hidráulico y ambientales, encontrando que la eficiencia del clarificador secundario trabaja bajo condiciones óptimas

1.1 ANTECEDENTES

El evaluar una planta de tratamiento de aguas residuales o un proceso en específico de una PTAR, representa garantizar el logro de los objetivos técnicos y económicos que están involucrados en el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales. Diferentes investigadores toman este concepto y lo focalizan a sus necesidades para establecer la metodología de revisión de los factores involucrados como los hidráulicos.

Existe interés en utilizar la metodología estímulo-respuesta, por ejemplo: Loaiza y Fall en 2010, modelaron el proceso de lodos activados en la PTAR Noreste en Apodaca, Nuevo León, generando un estudio hidrodinámico del reactor central y lateral en la planta, también llevaron a cabo una presimulación con el programa Aquasim para el diseño de muestreo de trazador, realizando por último la evaluación cinemática de los lodos en el sedimentador secundario. Establecieron que el reactor central se representa mejor con un modelo de cinco tanques en serie, mientras que el reactor lateral con tres tanques en serie. Encontraron en el sedimentador secundario los parámetros del modelo Vesilind (Vesilind, A., 1968).

Flores *et al.*, en 2008 en su investigación realizaron una presimulación con Aquasim como herramienta para pruebas de trazadores a escala real. Determinando las propiedades del proceso de lodos activados y concluyendo que es un método adecuado para dichos fines. También comenta que existen otros tipos

de herramientas de simulación como Biowin y GPS-X, sin entrar en detalle en cómo utilizarlos.

Frederick Hart en 1994, realizó un análisis de trazadores en un clarificador secundario y en una cámara de contacto de cloro. Utilizando Rodamina wt en pulso como trazador debido a alta detectabilidad a bajos niveles de concentración en un fluorómetro. Este autor da recomendaciones para la recolección de muestras y determinar los factores hidrodinámicos del clarificador, también para la determinación del modelo tanques en serie en hojas de cálculo.

Fall y Loaiza en 2008 realizaron una calibración a escala real de un reactor de lodos activados. Haciendo una presimulación en Aquasim para diseñar las pruebas de trazador con Rodamina wt y así poder determinar el modelo hidráulico del reactor. Los autores establecen que el uso de la presimulación da pie a tomar en cuenta la recirculación en el proceso de lodos activados y así diseñar con mejor precisión el muestreo del efluente en el reactor.

Por su parte, Marín Escalona en 2007 determinó la distribución de tiempos de residencia en un reactor continuo con la metodología estímulo-respuesta, utilizando un pulso de cloruro de sodio como trazador y un conductímetro como herramienta de detección. En este caso, la calibración del conductímetro resulta muy eficiente como guía para establecer la calibración en la experimentación.

Sánchez y Cardona en 2009 evaluaron el comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio de una planta de tratamiento de aguas residuales a escala en Colombia, utilizaron como trazador la Rodamina wt, encontraron que el modelo que más se aplica para su simulación resultó ser el modelo tanques en serie, también determinaron que las zonas muertas son nulas en el reactor aerobio mientras que el anaerobio es de 60%.

Patiño *et al.*, en 2012 evaluaron hidrodinámicamente un clarificador, llegaron a la conclusión que los patrones de comportamiento de este varían conforme a los diferenciales de temperatura dentro y fuera del clarificador las cuales crearon “corrientes de densidad térmicas” que promueven una mezcla en el interior ocasionando que el efluente saliera con mayor turbiedad.

Con respecto a la aplicación de diferentes tipos de trazadores, en 1999, De Clercq *et al.*, calibraron una PTAR usando como trazador un pulso de cloruro de litio (LiCl), determinaron con el modelo de tanques en serie las zonas muertas en los reactores y concluyeron que este modelo es una técnica generalizada para poder determinar la hidrodinámica de cualquier sistema.

Otro conjunto de autores que utilizaron LiCl, son Arroyane Gómez *et al.*, en 2005 avaluaron un reactor de una PTAR en Colombia, se destacó la importancia de una evaluación constante para garantizar los objetivos de diseño. Encontraron que el reactor se ajusta a un modelo de 3 tanques en serie y definieron que la inyección del trazador debe presentar una mezcla para tener una buena distribución. Pérez y

Torres en 2007, también utilizaron LiCl como trazador en las pruebas hidrodinámicas que realizaron a un reactor aerobio en Colombia, determinaron su porcentaje de zonas muertas de 5%, el cual genera una optimización al crecimiento del medio fijo e impacta en la efectividad de la planta al determinar un correcto funcionamiento hidráulico.

Giacoman *et al.*, en 2003 analizaron la hidrodinámica de un reactor a escala con ayuda de trazadores, en este caso se usaron pulsos de salmuera y se determinó su concentración con electrodos medidores de conductividad en el agua. Esta investigación demuestra que no importa la escala del estudio, lo fundamental de conocer las propiedades del reactor a estudiar y los datos requeridos para encontrar los porcentajes de zonas muertas existentes en el sistema.

La cinética de los lodos en un clarificador ha sido evaluada, por ejemplo: Gallego *et al.*, en 2008 evaluaron un sedimentador secundario enfocándose en la parte de la cinética de los lodos, realizaron ensayos para obtener las curvas de sedimentación y estudios de coagulación. Concluyeron que para complementar una investigación detallada es necesario realizar la parte en la investigación de la del clarificador.

Fall *et al.*, en el año 2007 realizaron la investigación de la cinemática de lodos en una planta en Monterrey México. Evaluando su desempeño y obteniendo los parámetros del modelo de Vesilind, realizando el análisis del flujo de sólidos. Este

tipo de datos son básicos para la modelación de la planta y así poder anticipar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

Existen diferentes tipos de investigaciones donde el determinar la distribución de los tiempos de residencia del tanque o proceso que se analiza, focaliza el tema principal de la investigación. Es el caso de Majewsky *et al.*, que en 2010 estudiaron la eficiencia de remoción xenobiótica en una planta de tratamiento de aguas residuales en Luxemburgo y dentro de sus actividades generaron una simulación con GPS-X de Hydromantis (Hamilton, Canadá), determinaron la distribución de los tiempos del tren de tratamiento, con la particularidad de realizar las pruebas a diferentes cambios de las condiciones del clima, principalmente la temperatura.

Rojas y García en 2010, investigaron los tiempos de retención de un sistema de lixiviación industrial, como trazador utilizaron carbonato de sodio y el equipo de absorción atómica para la medición de cantidades. Se determinaron los patrones del flujo en el sistema y fueron encontradas las características tales como el tipo de flujo, zonas muertas. Concluyeron que trabaja bajo flujo no ideal. Los autores expresan que en una planta de lixiviación no existe un flujo ideal real, como pasa en una PTAR. Con esto podemos establecer que el diseño de las PTAR es una actividad compleja en cualquier rama de la ingeniería.

Finalmente, Martín Domínguez *et al.*, en 2001 analizaron la hidrodinámica de una planta potabilizadora presentando un modelo de tanques en serie con varios reactores perfectamente mezclados, con zonas muertas y cortocircuitos, sin

recirculación. En este caso al ser una potabilizadora se utilizó como trazador sal común para no intervenir en el color del agua potable y hasta cierto punto controlar los excedentes de trazador en el efluente.

La tabla 1.1 muestra el resumen de la bibliografía utilizada en antecedentes, haciendo énfasis en la parte de la aplicación del método estímulo-respuesta.

Tabla 1.1 Resumen bibliográfico utilizado en antecedentes.

Autor (es)	Año	Objetivo de la investigación
Loaiza, J., & Fall, C.	2010	Modelaron el proceso de lodos activados en la PTAR Noreste, generando un estudio hidrodinámico del reactor central y lateral en la planta, también llevaron a cabo una presimulación con el programa Aquasim para el diseño de muestreo de trazador, realizando por último la evaluación cinemática de los lodos en el sedimentador secundario.
Flores <i>et al.</i>	2008	Realizaron una presimulación con Aquasim como herramienta para pruebas de trazadores a escala real. Determinando las propiedades del proceso de lodos activados y concluyendo que es un método adecuado para dichos fines.
Hart, F.	1994	Realizó un análisis de trazadores en un clarificador secundario y en una cámara de contacto de cloro. Utilizando Rodamina wt en pulso como trazador debido a alta detectabilidad a bajos niveles de concentración en un fluorómetro. Da recomendaciones para la recolección de muestras y determinar los factores hidrodinámicos del clarificador, también para la determinación del modelo tanques en serie en hojas de cálculo.
Fall, C., & Loaiza, J.	2008	Realizaron una calibración a escala real de un reactor de lodos activados. Haciendo una presimulación en Aquasim para diseñar las pruebas de trazador con Rodamina wt y así poder determinar el modelo hidráulico del reactor.
Marín Escalona, L.	2007	Determinó la distribución de tiempos de residencia en un reactor continuo con la metodología estímulo-respuesta, utilizando un pulso de cloruro de sodio como trazador y un conductímetro como herramienta de detección.
Sánchez, J., & Cardona, S.	2009	Evaluaron el comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio de una planta de tratamiento de aguas residuales a escala en Colombia, utilizaron como trazador Rodamina wt.
Patiño <i>et al.</i>	2012	Evaluaron hidrodinámicamente un clarificador, llegaron a la conclusión que los patrones de comportamiento de este varían conforme a los diferenciales de temperatura dentro y fuera del clarificador las cuales crearon “corrientes de densidad térmicas”.
Clercq <i>et al.</i>	1999	Calibraron una PTAR usando como trazador un pulso de cloruro de litio (LiCl), determinaron con el modelo de tanques en serie las zonas muertas en los reactores y concluyeron que este modelo es una

		técnica generalizada para poder determinar la hidrodinámica de cualquier sistema.
Arroyane et al.	2005	Evaluaron un reactor de una PTAR en Colombia, se destacó la importancia de una evaluación constante para garantizar los objetivos de diseño. Encontraron que el reactor se ajusta a un modelo de 3 tanques en serie y definieron que la inyección del trazador debe presentar una mezcla para tener una buena distribución.
Pérez, A., & Torres, P.	2007	Utilizaron LiCl como trazador en las pruebas hidrodinámicas que realizaron a un reactor aerobio en Colombia, determinaron su porcentaje de zonas muertas de 5%, el cual genera una optimización al crecimiento del medio fijo e impacta en la efectividad de la planta al determinar un correcto funcionamiento hidráulico.
Giacoman et al.	2003	Analizaron la hidrodinámica de un reactor a escala con ayuda de trazadores, en este caso se usaron pulsos de salmuera y se determinó su concentración con electrodos medidores de conductividad en el agua.
Gallego et al.	2008	Evaluaron un clarificador secundario enfocándose en la parte de la cinética de los lodos, realizaron ensayos para obtener las curvas de sedimentación y estudios de coagulación.
Fall et al.	2007	Realizaron la investigación de la cinemática de lodos en una planta en Monterrey México. Evaluando su desempeño y obteniendo los parámetros del modelo de Vesilind, realizando el análisis del flujo de sólidos.
Majewsky et al.	2010	Estudiaron la eficiencia de remoción xenobiótica en una planta de tratamiento de aguas residuales en Luxemburgo y dentro de sus actividades generaron una simulación con GPS-X y determinaron la distribución de los tiempos del tren de tratamiento.
Rojas, A., & García, A.	2010	Investigaron los tiempos de retención de un sistema de lixiviación industrial, como trazador utilizaron carbonato de sodio y el equipo de absorción atómica para la medición de cantidades. Se determinaron los patrones del flujo en el sistema y fueron encontradas las características tales como el tipo de flujo, zonas muertas.
Martín Domínguez et al.	2001	Analizaron la hidrodinámica de una planta potabilizadora presentando un modelo de tanques en serie con varios reactores perfectamente mezclados, con zonas muertas y cortocircuitos, sin recirculación. En este caso al ser una potabilizadora se utilizó como trazador sal común para no intervenir en el color del agua potable.

1.2 Aporte Científico-Técnico

a) Definir la metodología para implementar una revisión del comportamiento hidráulico en un clarificador secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales, a fin de sentar precedente a que se implemente dicha práctica también a otras plantas similares, ya que, la planta bajo estudio no genera lodo, y la sedimentación del licor mezclado pudiera tener características especiales.

b) Identificar posibles anomalías en el patrón hidráulico, establecer qué factores influyen en caso de presentarse y formular recomendaciones para sortear dichas posibles anomalías.

1.3 Justificación

Actualmente, el tema del agua en el mundo es un punto clave en el desarrollo de cualquier ciudad, tanto en su enfoque poblacional o industrial, teniendo como principal objetivo mantener en balance el delicado ciclo del agua que despliega en un correcto uso de los recursos que ayudan a mantenerlo.

El implementar un plan de revisión del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas ayuda al ahorro de insumos como energía eléctrica, corroborando si está operando correctamente según diseño.

Por ende, al realizar la metodología descrita en la planta analizada (PTAR Zuazua), se establecerá si existe alguna variación en el comportamiento del clarificador secundario respecto a las condiciones iniciales de diseño y en caso de existirla, deducir por qué se presenta dicha variación y que factores pudieran afectar en particular el clarificador en estudio.

Lo anterior, con la finalidad de crear un juicio que ayude a diseñadores de plantas de tratamiento de aguas residuales, aportando en la implementación de una técnica de experimentación, el enfoque que se le dio a la pre-simulación. De acuerdo con la revisión de la literatura efectuada se encontró que está descrita someramente.

1.4 Hipótesis

Si se determina el tiempo de residencia real de un clarificador secundario, con la metodología estímulo-respuesta y se compara al tiempo teórico de diseño, entonces se podrá ajustar el proceso de la planta de tratamiento, eficientizándolo para la toma de decisiones con respecto al diseño y ajuste.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Comparar el tiempo de residencia real y teórico de un clarificador secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales, mediante la técnica estímulo-respuesta para comprobar la eficiencia de dicho proceso.

1.5.2 Objetivos específicos

- Aplicar la metodología del método estímulo-respuesta para analizar el tiempo de residencia de un clarificador secundario.
- Analizar el tiempo de residencia del clarificador secundario con respecto a factores físicos, operativos y ambientales.
- Establecer los factores de operación que pudieran afectar el clarificador secundario y que provoquen una posible ineficiencia.
- Comparar los tiempos teóricos y reales de residencia del clarificador secundario para poder establecer una base de diseño, y si es posible optimizar dicho proceso.
- Aplicar un modelo matemático de comparación para obtener otra base que fundamente los resultados de la investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Tratamiento de aguas residuales, breve historia y sus fundamentos.

El mantener las aguas residuales bajo una disposición inadecuada desata perturbaciones en el entorno que está involucrado, el establecer que esta correcto y cómo lograrlo tiene en la conciencia de los humanos relativamente poco tiempo. La amplitud en el conocimiento establece normatividades para dicha disposición, distinguiendo los diferentes alcances que establecen según las zonas que se rijan.

Por ejemplo, el primer sistema de alcantarillado se construyó en año 1842 en Alemania, siendo un ingeniero ingles de apellido Lindley el que en ese entonces, al reconstruir parte de la ciudad por un incendio, por lo cual implementó un sistema el cual conserva diversos principios utilizados actualmente.

El proceso se empezó a implementarse cuando la autopurificación en medios naturales, como ríos y arroyos, no se dio abasto, provocando inconformidades de los habitantes cercanos que a la vez desataron la necesidad de razonar tratarlas artificialmente.

No fue sino hasta principio de 1920 cuando el tratamiento de aguas residuales estaba evolucionando en lo que actualmente rige comúnmente, aunque el diseño se realizaba empíricamente y no fue hasta mediados del siglo XX cuando este empezó a implementarse científicamente.

En ese entonces se reemplazó el vertido del efluente en terrenos y se empezó a realizar en cuerpos de agua naturales superficiales, todo esto con el criterio de las aguas tratadas y controlada de contaminantes, el asimilamiento natural sería menos resistente.

Aunque en el caso de México, en gran parte del siglo XX el tratamiento de las aguas residuales no se realizaba en todas las ciudades y ante la ausencia de normas y/o leyes, estas echaron a perder la naturaleza pura de las corrientes de agua, convirtiéndose inútiles para diversos fines ya sean recreativos ó de aprovechamiento humano (Valdéz y Vázquez, 2003).

Las fuentes de aguas contaminadas pueden ser domésticas o industriales, por ende su composición es muy variada, haciendo referencia a la domestica, esta puede contener desperdicios alimenticios, grasas, desechos de inodoros, jabón de baño y de ropa y demás desperdicios orgánicos e inorgánicos presentes. Por estas razones es necesario establecer en general los objetivos de los sistemas utilizados para su descontaminación.

Las operaciones unitarias se conocen como los diversos métodos enteramente físicos que al complementarse a los métodos químicos o biológicos, también llamados procesos unitarios, establecen los componentes de una planta de tratamiento de aguas residuales. Constituyendo así los llamados tratamientos primarios, secundarios y terciarios, que vienen siendo una combinación complementaria.

En el tratamiento primario se contemplan únicamente el uso de operaciones enteramente físicas, como la sedimentación para la eliminación de sólidos sedimentables y flotantes presentes en el afluente. El tratamiento secundario se integra de procesos biológicos y químicos a los que se complementan operaciones físicas para establecer mejores condiciones de agua residual tratada, tratando de eliminar la mayor cantidad de materia orgánica presente. El tratamiento terciario emplea diversas combinaciones extras o adicionales de los procesos anteriormente mencionados, con el fin de establecer una mayor calidad de efluente. Un ejemplo muy general puede ser la remoción de nitrógeno y fosforo (Metcalf y Eddy, 2003).

El propósito de los tratamientos físicos, químicos y biológicos diseñados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, es representarlos respecto a los presentes en los sistemas naturales de asimilación. Con la diferencia de la implementación tecnológica maximizando los resultados para conseguir una mejor calidad de efluente en una fracción menor de tiempo.

Existen diversos factores que afectan la calidad del agua en los sistemas naturales, ya sean razones estéticas o de salud pública, aunado a las partes donde la infraestructura necesaria no está dentro de sus posibilidades. En México, rigen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las cuales determinan los parámetros a cumplir por los organismos encargados de las plantas de aguas residuales (PTARS) (Valdéz y Vázquez, 2003).

2.2 Tratamiento secundario (lodos activados).

El proceso de lodos activados está definido como el desarrollo de un cultivo suspendido, proceso desarrollado por Arden y Lockett en 1914 en Inglaterra.

Al agitarse en presencia de oxígeno el agua residual, proveniente de un tratamiento primario, se genera un flóculo de lodo en el cual se desarrollan organismos y bacterias, por ende el nombre de “activo” al absorber y oxidar la materia orgánica presente. Cuando el lodo consigue tener buenas condiciones, se posa rápidamente y arrastran los sólidos suspendidos y la materia coloidal. Pasando a sedimentar y ser regresados al reactor para incrementar su biomasa y así acelerar las reacciones. A esta mezcla de lodos y agua residual por tratar se le nombra como licor mezclado. Con esto se puede establecer que el proceso de lodos activados es un proceso de cultivo suspendido recirculado con los siguientes objetivos:

- Producir un efluente suficientemente clarificado para ajustarse a las normas de descarga.
- Concentrar los sólidos para minimizar la cantidad de lodos que se manejarán.

Para esto es importante que el diseño de los clarificadores secundarios sean parte integral del sistema de lodos activados (Valdéz y Vázquez, 2003).

El clarificador secundario, procesa el licor mezclado proveniente del reactor biológico, separando el líquido y el lodo presente en este licor, el líquido clarificado es conducido por vertedores en la superficie del mismo mientras que el lodo que sedimenta es recirculado al sistema.

En su mayoría, los clarificadores secundarios son circulares, aunque existen los rectangulares. Ambos son equipados con barredoras de fondo, que ayudan a remover los lodos de fondo, y un recolector de espumas superficiales. En el caso de los circulares, estos tienen una pendiente, regularmente de 1/12, el cual depende del proveedor el cual provee del diseño.

Dependiendo de las características del agua residual que trata la planta (tipo, gasto, etc.), parte de los lodos se remueve del sistema en una purga que conduce hacia el almacenamiento de lodos en exceso, que también dependiendo de los alcances de la planta, estos son procesados.

El correcto balance entre proveer suficiente área en el estanque y que la velocidad hidráulica no genere que los lodos no sedimenten, es un punto crucial en el diseño empírico de clarificadores secundarios y que poco a poco se han implementado lo recolectado en investigaciones en pro de mejorar estos procesos (Nanning, 2003). Tal es el caso de esta investigación.

2.3 RTD “Distribución de los tiempos de residencia”.

El caso más sencillo en el estudio y simulación de tanques, hablando de la parte hidrodinámica, es suponer que la circulación es cercana a los modelos ideales, tales como “flujo pistón” o “mezcla perfecta”. Pero en la realidad los tanques se comportan muy diferente a los “perfecto”.

Esto debido posiblemente a las siguientes razones: a) No todas las moléculas que pasan por el tanque permanecen en él igual tiempo. b) Existen “zonas muertas” en las que el fluido prácticamente no se renueva. c) Existen “cortocircuitos” en los que parte de la corriente de alimentación pasa directamente a la corriente de salida, sin existir mezcla con el resto de las moléculas del tanque. d) Los reactivos y/o los productos forman aglomeraciones y no se mezclan entre sí (UAM, 2007).

El denominado “flujo pistón” se describe como aquel flujo en el que el total de sus partículas entran a una unidad y permanecen en ella un mismo determinado tiempo, pasando a través del sistema y descargándose a la misma secuencia en el que fueron integrados sin generar alguna mezcla entre estas y las partículas presentes dentro de la unidad.

En campo es difícil lograr que un flujo mantenga este patrón de características, siendo los que más se aproximan los canales tipo Parshall, floculadores de pantalla, vertederos y decantadores con relación largo/ancho mayor a uno.

El “Flujo mezclado” es el que se describe como aquel que todo elemento que ingresa a un tanque se dispersa inmediatamente en él, cumpliendo que la concentración a la salida es igual a la existente en todo el tanque.

Al igual que el caso anterior, es muy difícil lograr que un flujo mantenga este patrón de comportamiento, acercándose los retromezcladores mecánicos con pocas cámaras en serie.

Por último se presenta el flujo no ideal, el cual corresponde a un punto intermedio entre el flujo pistón y mezcla completa, acompañado de zonas muertas, cortos circuitos, recirculación. Los cuales no serán eliminados dado a que lo ideal no existe, y este tipo de comportamiento es el presente en todas las unidades en plantas de tratamiento de aguas residuales (CEPIS, 2005).

Conocer a detalle el comportamiento de flujo a través de un tanque es físicamente imposible, pero con fines de acercarnos a este objetivos y poder diseñar con mejor precisión, es suficiente conocer el tiempo en que las moléculas del fluido permaneces en este. Y aunque el total del fluido permanezca un tiempo determinado único, ciertos elementos de este presentan una variación en este parámetro. A este fenómeno se le denomina distribución de residencia y el cual está definido matemáticamente.

La función de los tiempos de residencia “E (t)” se define, de acuerdo a la teoría de las probabilidades, como la frecuencia de distribución de edad de los elementos de fluido que abandonan un recipiente. Todo esto en un cierto tiempo determinado, t_1 y t_2 . Y esta función rige la ecuación 1.

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

t= tiempo

E (t)= Función de los tiempos de residencia

De modo que:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

C (t) = Concentración de trazador

Las ecuaciones anteriores se representan gráficamente en la figura 2.1, donde el comportamiento tanto de la curva RTD y la curva de concentración son iguales difiriendo en el eje vertical de la gráfica, esto se debe a las unidades que maneja cada una (Scott Fogler, 2004).

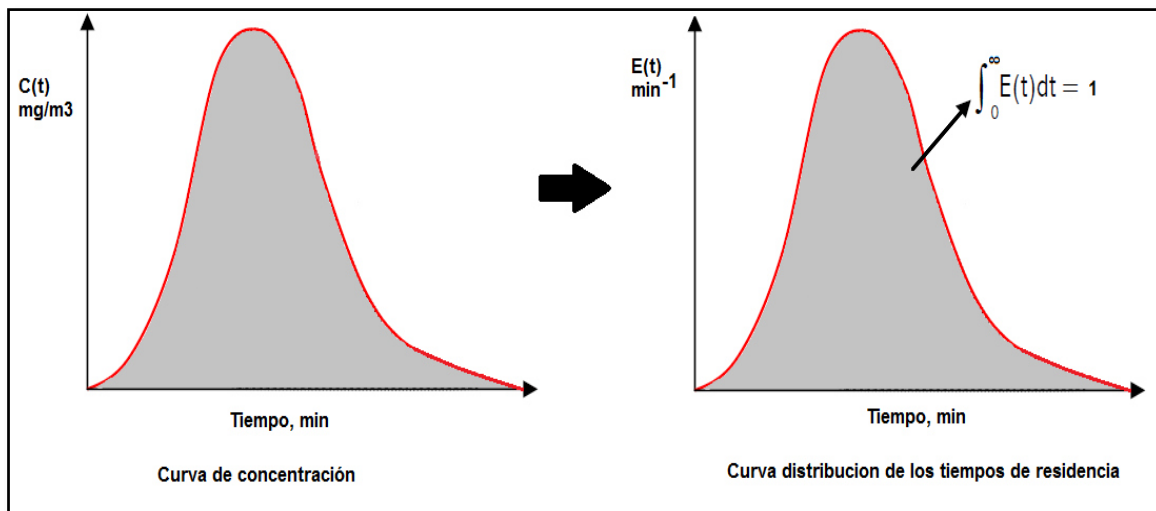


Figura 2.1 Curva de concentración y curva RTD (adaptada de Scott Fogler, 2004).

La otra función relacionada con la RTD, es la función acumulativa $F(t)$, esta representa la fracción del flujo que sale del tanque y que ha estado dentro del mismo un tiempo menor a "t". Su definición matemática sería, la probabilidad que un elemento del flujo que entró al tanque en el tiempo igual a 0, abandone antes de un tiempo igual a "t" (Cunill *et al*, 2010). Esta función rige la ecuación 3.

$$F(t) = \int_0^{\infty} E(t)dt \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$F(t)$ = Función acumulativa.

Pero la definición simple de acumulamiento resulta más fácil de entender al lector de este concepto parte la figura 2.2, la cual establece el comportamiento acumulativo del flujo estudiado (Cunill *et al*, 2010).

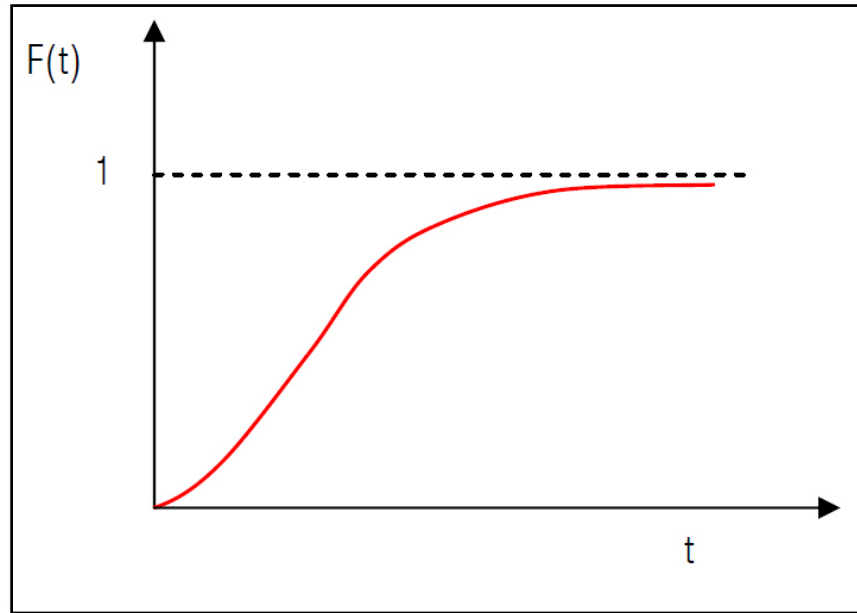


Figura 2.2 Comportamiento de la función $F(t)$, la cual siempre su máximo será la unidad al tiempo máximo de medición (adaptada de Cunill *et al*, 2010).

La figura 2.3 muestra las diferencias en el comportamiento de los tiempos de distribución de residencia para los tres diferentes tipos de flujos: Flujo pistón, Flujo mezclado y Flujo no ideal.

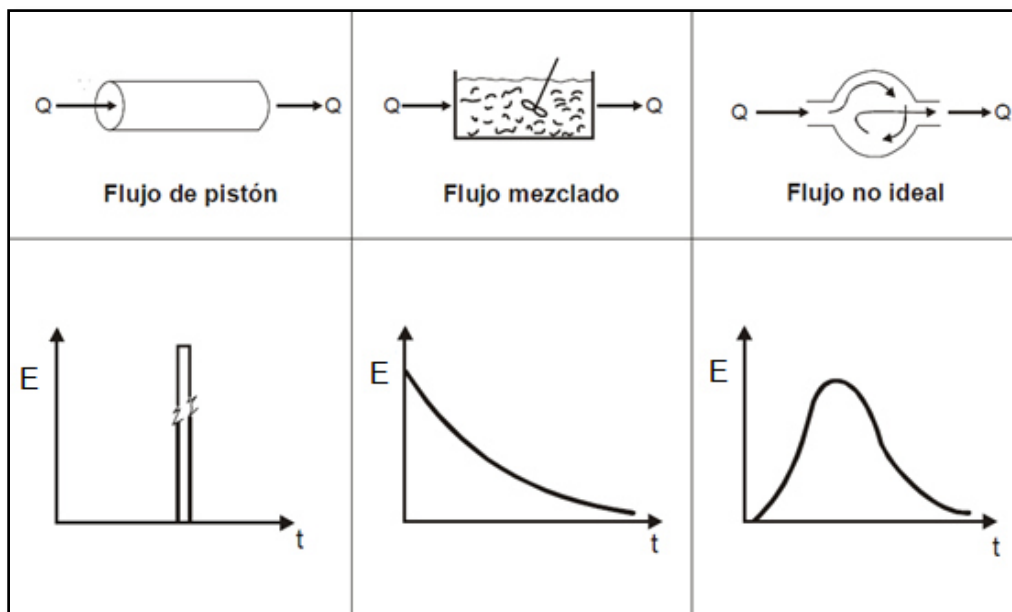


Figura 2.3 Diferencias entre los tipos de flujos (adaptada de Levienspiel, 2004).

Pese a lo mencionado anteriormente, un modelo matemático, es una imitación de lo sucedido en la realidad, con lo cual se busca generar perspicacia en el diseñador y así ir perfeccionando los sistemas de una PTAR (Echavarría *et al*, 2012).

Por otra parte, las denominadas “zonas muertas” presentes en el comportamiento de un flujo, son un factor macroscópico que se relacionan con el tiempo de residencia de la sustancia que se utiliza como trazador para la medición de dicha distribución de tiempos de residencia (Rojas, A., & García, A. 2010).

Existen dos tipos de zonas muertas, las ocasionadas por cortos circuitos hidráulicos y las provocadas por flujos estancados, estos fenómenos varían según la zona de estudio por diversos posibles factores como: diferenciales de temperatura, cambio en la composición del agua residual, falta de mantenimiento en la PTAR, etc.

Estas zonas muertas, reducen la eficacia del sistema, indicando volúmenes menores a los esperados. La figura 2.4 muestra como es el comportamiento de la RTD de un flujo con cortos circuitos.

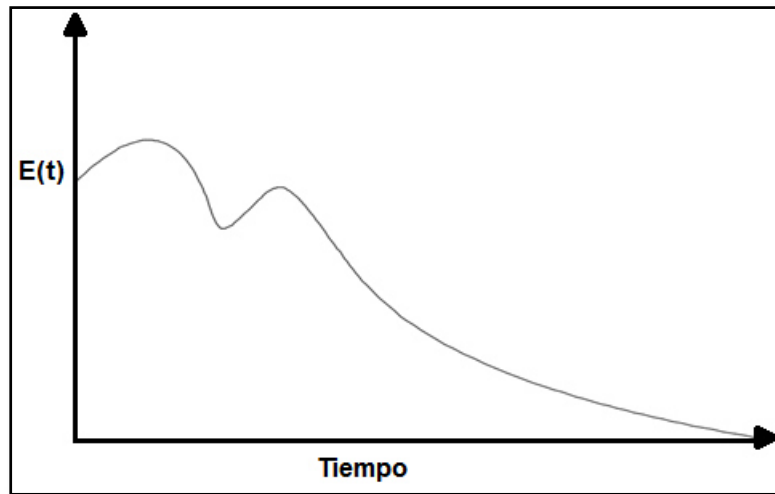


Figura 2.4. Comportamiento típico de la RTD de un flujo con cortos circuitos (adaptada de Scott Fogler, 2004).

2.4 Estímulo-Respuesta, trazadores y su detección.

La información del comportamiento de un flujo en un tanque es determinada directamente con la metodología de investigación denominada “estímulo-respuesta”. La DTR se determina añadiendo una sustancia inerte llamada comúnmente como trazador (Marín Escalona, 2007).

El experimento inicia en $t=0$, que es cuando la sustancia elegida como trazador es inyectada a la entrada del tanque, comenzando simultáneamente a realizar las mediciones a la salida del tanque. Este trazador debe tener ciertas características a las del interior del tanque en estudio, además no adsorberse al tener contacto con el medio y así este material continuará con el resto del flujo (Scott Fogler, 2004).

En este punto de la investigación es cuando se puede definir las variaciones de comportamiento y empezar a deducir qué las genera, debido a diversos factores que el investigador tiene que estar pendiente durante el desarrollo del método (Smith, 1991).

Los trazadores pueden tener las siguientes características:

- Colorantes como fluoresceína o rodamina.

- Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros o nitratos, especialmente de sodio.
- Elementos radiactivos como isótopos.
- Ácidos: clorhídrico, benzoico.
- Otras sustancias químicas: alizarim, sapirol, naptol.

Un factor importante a la hora de elegir la sustancia trazadora es tener en cuenta los insumos que se tienen a la mano, sobre todo los equipos con los que se cuentan para realizar las mediciones de concentración. También es conveniente elegir como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos que existen en el agua residual presente en el tanque. Así como también elegir el trazador respecto a los fines del estudio. Para un estudio en una planta potabilizadora, la elección del trazador es más cautelosa para no intervenir en la calidad del efluente (CEPIS, 2005).

La tabla 2.1, presenta los trazadores más comunes para los diferentes campos de aplicación de los mismos, así como también y el método para la detección de concentración.

Tabla 2.1. Tipos de trazadores, sistema preferente a estudiar y su método de detección (adaptada de CEPIS, 2005).

Trazador	Sistema	Método de detección
Cloruro de sodio	Lagunas (escala laboratorio)	Titulación
Rodamina wt (20%)	Lagunas (piloto y campo)	Fluorómetro
Rodamina wt (20%)	Lagunas (escala campo)	Fluorómetro
Rodamina wt	Lagunas aeradas	Fluorómetro
Fluoresceína	Tanques de sedimentación	Colorimétrico
Rodamina B	Tanques de cloración	Fluorométrico
Rodamina wt	Ríos - lagunas aeradas	Fluorómetro
Rodamina B	Ríos	Fluorómetro
Rodamina wt	Ríos (reaeración)	Fluorómetro
Tritio (3H)	Ríos (reaeración)	Contador
Kriptón-85	Ríos (reaeración)	Contador
Tritio (3H)	Ríos-mar-agua subterránea	Contador
Bromo (82Br)	Filtros biológicos	Contador
Bromo (82Br)	Emisario submarino	Contador
Tintura orgánica azul	Canales de laboratorio	Fotográfico
Hierro (59Fe)	Lodo de sedimentador	Contador
Rodamina wt	Reservorios	Fluorómetro
Bromo (82Br)	Aforo de ríos	Contador
K Br (82Br)	Calibración Parshall	Contador
Na I (131I)	Dinámica de lagos	Contador
Bromo (82Br)	Conexiones ilícitas en alcantarillado	Contador
K Br/NH4Br (82Br)	Difusión en emisario submarino	Contador
Kriptón (85K) NaBr (82Br)	Estudio de capacidad asimilativa de ríos	Contador
Tritio (3H)		
Bromo (82Br)	Lagunas	Contador

Hablando específicamente de la Rodamina WT, este es un trazador de amplio rango, tanto en pH como en salinidad, por lo tanto puede ser utilizado en aguas continentales, marinas y aguas residuales tratadas. Además posee una baja

adsorción por los sólidos suspendidos, por lo que puede ser utilizada en cuerpos de agua con un alto contenido de éstos.

La parte llamada estímulo o perturbación del trazador, también puede ser variada al momento de ser introducida dependiendo los alcances que se quieran lograr en la investigación, existiendo las siguientes formas:

- Entrada en escalón, en el que la concentración de un trazador en el influente al reactor cambia de un estado estacionario a otro distinto.
- Entrada en impulso, en el que una cantidad relativamente pequeña de trazador se inyecta a la corriente.
- Entrada periódica o sinusoidal, en el que se cambia la frecuencia de una variación sinusoidal.
- Entrada al azar, el caudal de trazador introducido en la corriente de alimento varía al azar.

Para los alcances de establecer los tiempos de distribución de residencia en un tanque, el método preferencial es el de entrada en escalón, ya que nos permite detallar el análisis de una determinada cantidad de flujo (BENTOS, 2007).

Por otra parte, es importante ser administrados en el momento de realzar la experimentación. Por ende, el simular lo que se quiere realizar para así determinar el tiempo de recolección de muestras y determinar con precisión la DTR en el

tanque. El programa AQUASIM, es un programa desarrollado por el Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Ambiental (EAWAG) por el Dr. Peter Reichert en el año 1994.

Este programa, presenta la configuración espacial de un modelo, la cual se representa mediante compartimentos que se conectan con diagramas de flujo. Dichos compartimentos pueden ser: un reactor, un río, un lago, o simplemente una cámara de aireación. Los cuales pueden reproducir diferentes fenómenos, tales como: procesos de transporte, procesos de reacción, etc. El programa permite que el diseñador defina sus propios parámetros de modelación de diferentes modelos ambientales (Reichert, 1998).

2.5 Modelo Tanques en Serie

Los modelos matemáticos son de gran utilidad para lograr una representación de las características reales de un tanque, y así determinar si este funciona bajo diseño o presenta mal funcionamiento (Levienspiel, 2004).

El modelo tanques en serie, es un modelo de un parámetro, matemáticamente sencillo de resolver sin importar la cinética del comportamiento. Este consiste en considerar hipotéticamente una serie de tanques agitados ideales colocados en serie y así determinar dicho número (N) de tanques que representen al tanque real, el cual es el parámetro a encontrar. La figura 2.5 describe la suposición implícita en el modelo.

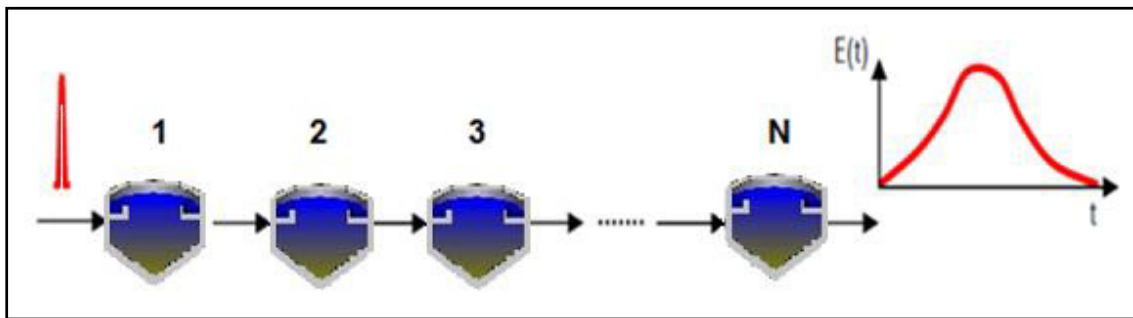


Figura 2.5. Representación gráfica del modelo “Tanques en serie” (Cunill, 2010).

El modelo “Tanques en Serie” rige bajo la ecuación 4:

$$E(t) = \frac{t^{n-1}}{(n-1)! \cdot \tau^n} * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

t = tiempo

n = número de tanques

T = representa el volumen del tanque dividido entre la velocidad del flujo.

La figura 2.6 representa el comportamiento del modelo “Tanques en Serie” y como va representando el flujo mixto ($N=1$) hasta el flujo pistón ($N=\infty$), detallando que para los tanques sedimentadores, se es necesario un punto medio entre estos dos, sin establecer un número de tanques ideal.

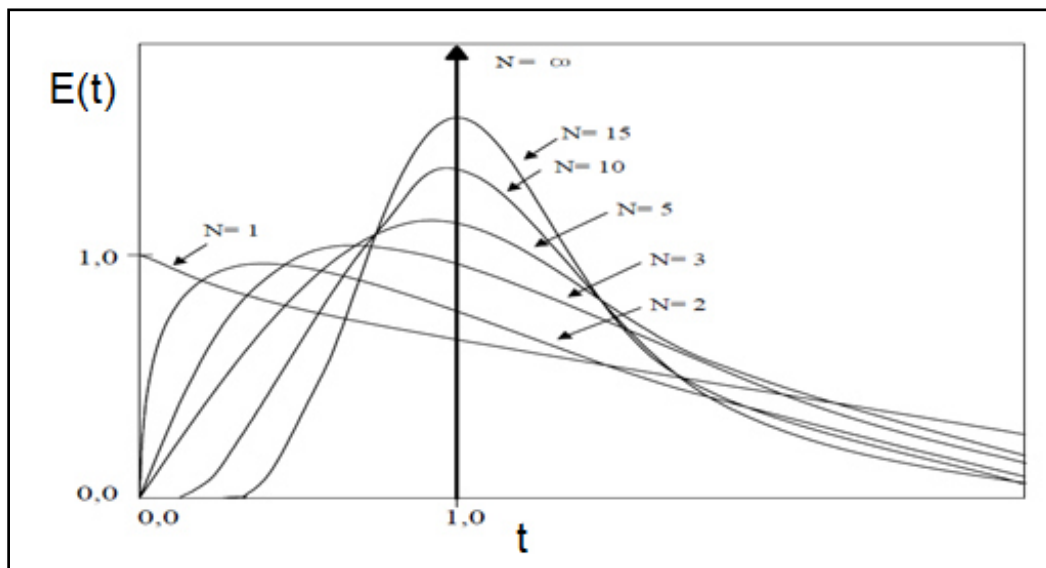


Figura 2.6. Comportamiento del modelo “Tanques en serie” (adaptada de Scott Fogler, 2004)

3. METODOLOGÍA

La presente metodología pretende establecer un método característico del experimento estímulo-respuesta al clarificador a estudiar, aplicar ajustes a las características del clarificador a analizar y generar variables positivas al experimento que estimulen el desarrollo de la investigación.

El organismo encargado de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el estado de Nuevo León, Servicios de Agua y Drenaje en Monterrey (SADM), cuenta con diferentes plantas que tratan las necesidades del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), las cuales cuentan con una capacidad considerablemente grande comparando a la planta analizada. Se optó por realizar el experimento en la PTAR del municipio de Zuazua, Nuevo León. Esta planta tiene una capacidad máxima de 140 l/s, lo cual representa un uso menor de volumen de trazador.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en diferentes etapas, tanto en campo como en laboratorio y gabinete, la figura 3.1 muestra el diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo en esta investigación.

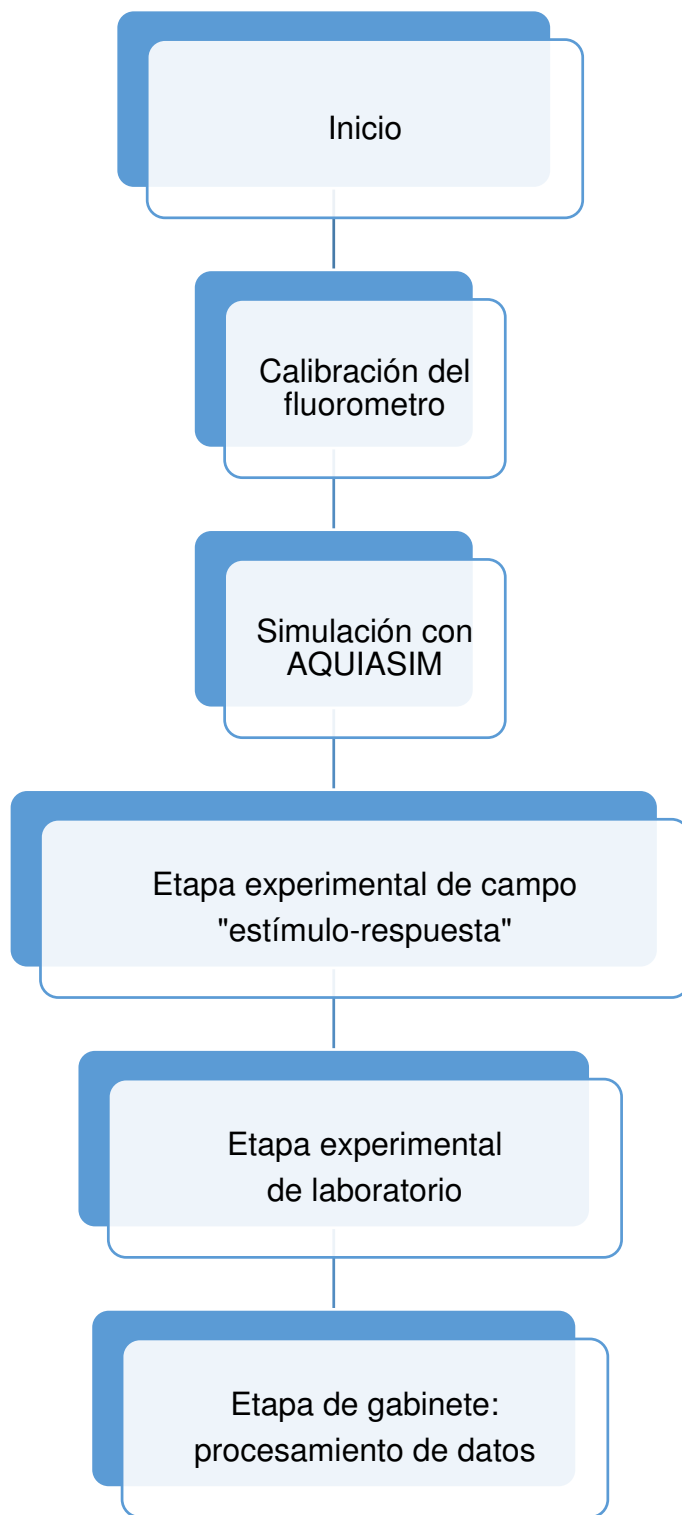


Figura 3.1. Diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo en esta investigación.

3.1 Calibración del fluorómetro

La calibración del fluorómetro se debe realizar para ajustar los valores al rango de medición correspondiente, ya que sin la realización de esta, se tendrían datos erróneos los cuales determinan la calidad de los resultados en el experimento.

Para la ejecución de la calibración, se realizaron diluciones con el efluente del clarificador a diferentes concentraciones controladas de Rodamina WT a 0, 20, 40, 60, 80 y 100 mg/m³ (Figura 3.2), con el fin de obtener parámetros base de medición del trazador y contrastarlas con los datos que arrojen las muestras recolectadas durante la experimentación de campo.



Figura 3.2 Área de trabajo en el laboratorio. Diluciones a diferentes concentraciones para la calibración.

Posteriormente, con un fluorómetro (Figura 3.3), las muestras fueron analizadas, de una en una, mediante la técnica de espectrometría por fotoluminiscencia.



Figura 3.3. Fluorómetro del departamento de Ecomateriales y Energía, IIC-UANL (Marca: Agilent Technologies, modelo: Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer).

El equipo tiene como características que utiliza una lámpara de flash de Xenón para una sensibilidad superior de la emisión de luz a partir de los cuatro modos diferentes de análisis que cuenta, ya sea en modo de sólidos o como en nuestro caso de líquidos.

El fin de esta calibración fue ajustar la longitud de onda donde la Rodamina WT se detectó y establecer el parámetro base con el que se realizaron las mediciones de la concentración de Rodamina wt en el efluente del clarificador secundario. Una vez obtenidos los datos se asoció la intensidad respecto a la concentración controlada con la cual se encontró, con la técnica de regresión, una

ecuación lineal. Lo anterior permitió establecer la concentración real en la experimentación.

3.2 Pre-simulación con AQUASIM

Antes de realizar la etapa de campo, se generó una presimulación en el programa AQUASIM con el fin de establecer los tiempos de duración del experimento, esta genera una curva “concentración de trazador vs tiempo” teórica del clarificador a estudiar (Figura 3.4). La cual se utilizó como perfil de comportamiento para generar el plan experimental de campo, estableciendo los tiempos de muestreo, contrastándola con los datos obtenidos en la experimentación.

Esta etapa no se realiza comunmente conforme a lo consultado en la literatura, pero es determinante para establecer tiempos de muestreo eficientes, lo que conlleva, no desperdiciar tiempo en muestreo el cual quedaría de más en la experimentación (Arroyane *et al.*, 2010).

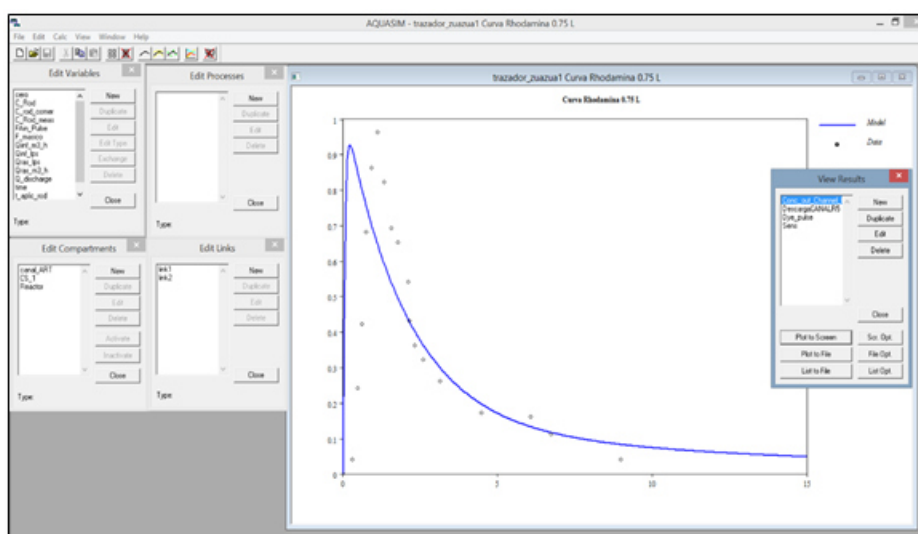


Figura 3.4. Imagen de la simulación con AQUASIM, se observa la interfaz del programa y la curva “concentración de trazador vs tiempo” teórica.

3.3 Etapa experimental de campo

El trabajo experimental de campo se llevó a cabo en la PTAR Zuazua localizada al norte del AMM. La planta cuenta con dos tanques que funcionan como clarificadores secundarios en su tren de tratamiento (Figura 3.5), se seleccionó el clarificador secundario norte debido a la accesibilidad para la inyección del pulso de trazador. Donde el efluente proveniente del reactor biológico se separa hacia los dos tanques clarificadores, siendo así más seguro inyectar el pulso de trazador (Figura 3.6 y 3.7).

Como característica particular de la entrada al clarificador, ésta presenta una turbulencia que facilita la mezcla de la Rodamina WT con el afluente, esperando presentar flujo mixto en esta zona.



Figura 3.5. Imagen satelital de la PTAR Zuazua, enfatizando los clarificadores secundarios (Imagen generada con Google Earth Pro).

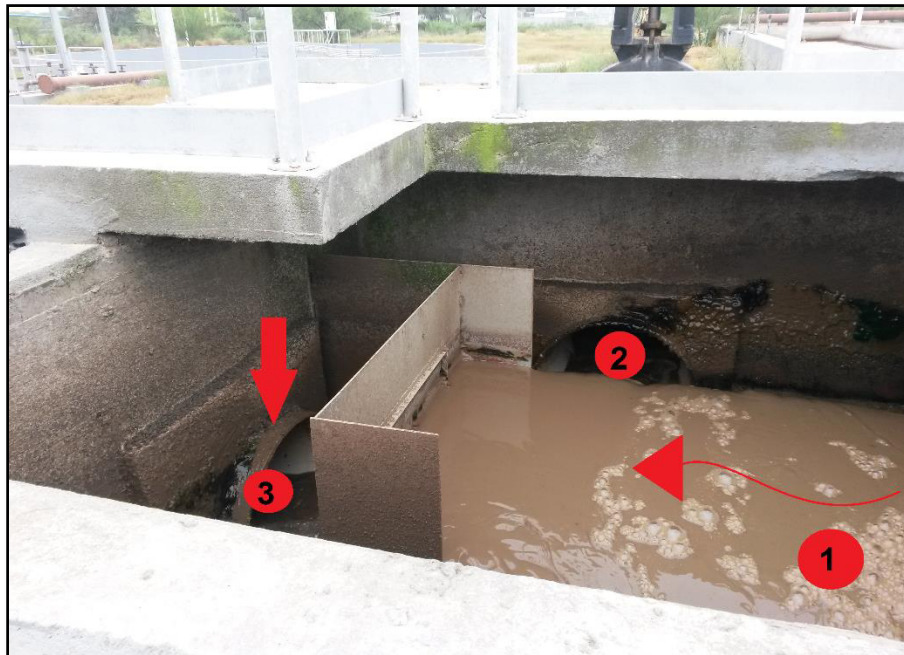


Figura 3.6. Punto dentro del tren de tratamiento (1) donde el líquido a tratar se separa hacia la entrada de los tanques clarificadores (2-Sur y 3-Norte).

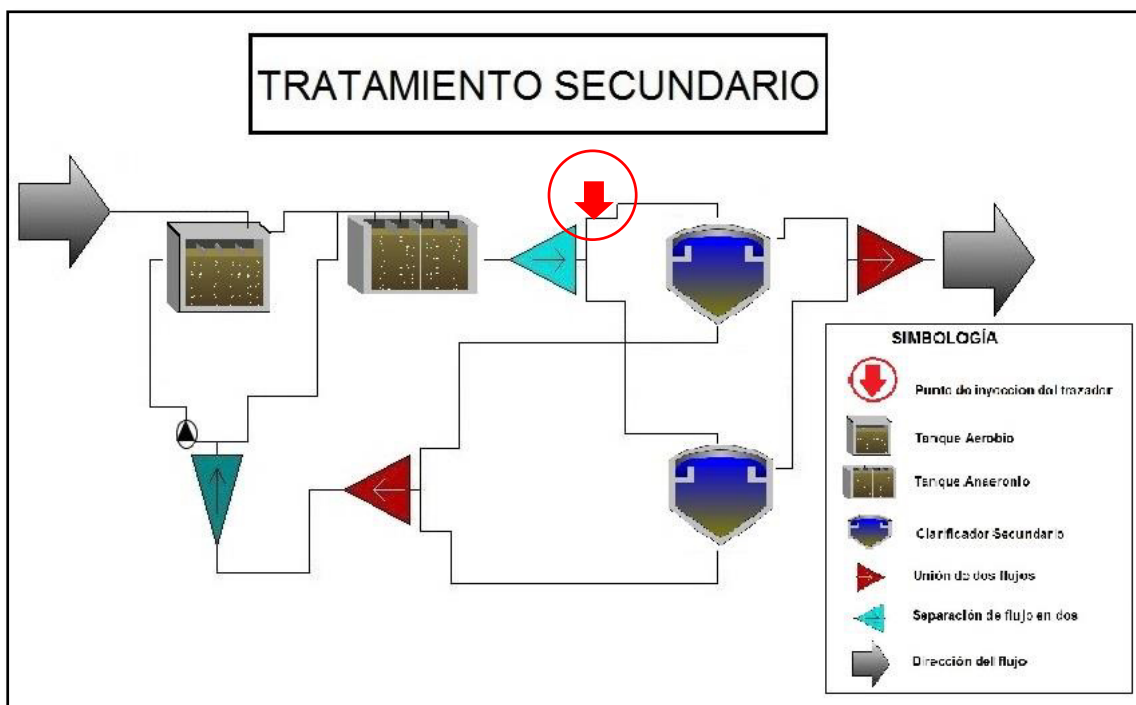


Figura 3.7. Esquema general de tratamiento secundario; Punto señalado, área donde se inyecta el pulso de trazador.

Se generó el diseño de la campaña de muestreo (Tabla 3.1) con base en factores como el tiempo del ciclo del clarificador, la presimulación realizada, etc. El muestreo durante las primeras cuatro horas se realizó a cada cinco minutos para tener una mejor calidad de datos resultantes, debido a que éste es el tiempo crítico del clarificador. Posteriormente el muestreo se llevó a cada 10 minutos durante tres horas, siguiendo a cada 15 minutos durante otras tres horas, después a cada 30 minutos durante 2 horas concluyendo a cada hora durante 12 horas para reunir 95 muestras en 24 horas de recolección.

Tabla 3.1. Tabla base para campaña de muestreo.

Tiempo en minutos	Intervalo de toma de muestras en	Número de muestra	Tiempo en minutos	Intervalo de toma de muestras en	Número de muestra	Tiempo en minutos	Intervalo de toma de muestras en	Número de muestra
0	5	1	160	5	33	400	10	65
5		2	165		34	410		66
10		3	170		35	420		67
15		4	175		36	435	15	68
20		5	180		37	450		69
25		6	185		38	465		70
30		7	190		39	480		71
35		8	195		40	495		72
40		9	200		41	510		73
45		10	205		42	525		74
50		11	210		43	540		75
55		12	215		44	555		76
60		13	220		45	570		77
65		14	225		46	585		78
70		15	230		47	600		79
75		16	235		48	630	30	80
80		17	240	10	49	660		81
85		18	250		50	690		82
90		19	260		51	720	60	83
95		20	270		52	780		84
100		21	280		53	840		85
105		22	290		54	900		86
110		23	300		55	960		87
115		24	310		56	1020		88
120		25	320		57	1080		89
125		26	330		58	1140		90
130		27	340		59	1200		91
135		28	350		60	1260		92
140		29	360		61	1320		93
145		30	370		62	1380		94
150		31	380		63	1440		95
155		32	390		64			

El experimento estímulo-respuesta inició a las 10:16 horas del día 25 de julio de 2014, el cual en su inicio constó de dos etapas simultaneas. Por una parte, en la entrada del clarificador se añadieron “en pulso” 750 ml de Rodamina WT. Al mismo tiempo, al momento de inyectar el pulso de trazador, se tomó la primera toma del efluente en la salida del clarificador. Las muestras fueron recolectadas con ayuda de un bote muestreador en el sitio en que se acumulaba el efluente a la salida del clarificador (figura 3.8), vertiendo el líquido recolectado en botes pet con capacidad de 250 ml, previamente numerados para su control.

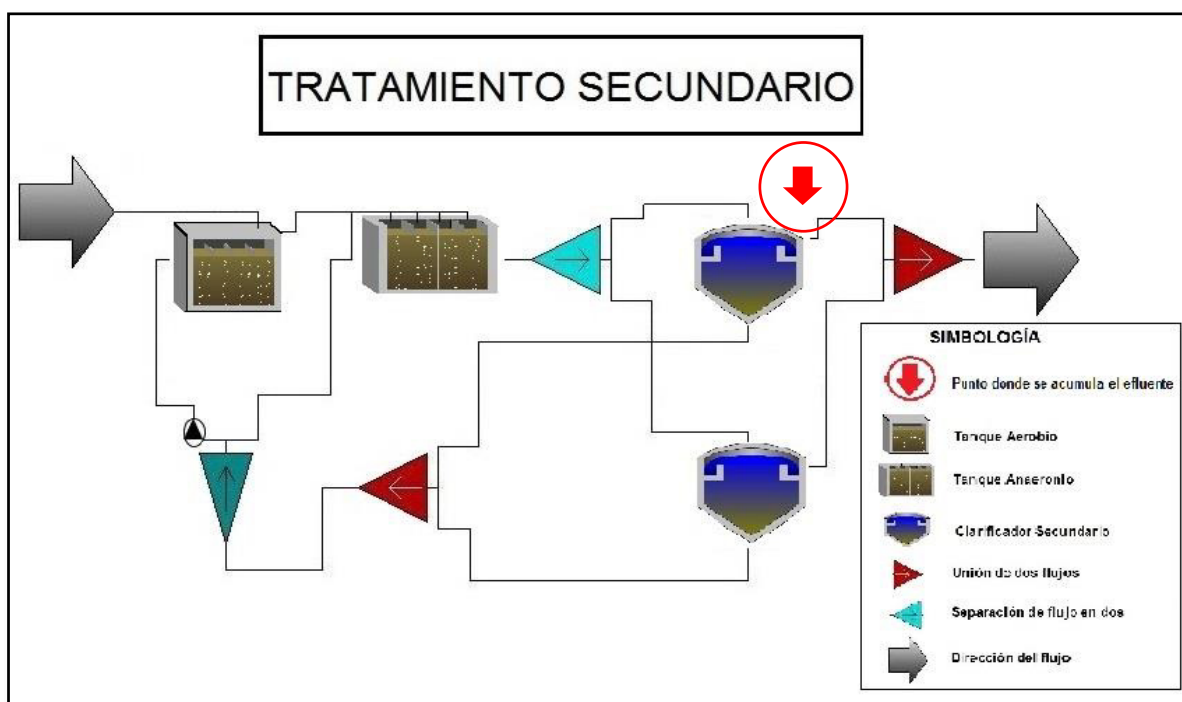


Figura 3.8. Esquema general de tratamiento secundario; Punto donde se acumula el efluente del clarificador secundario norte.

Posterior a la recolección, cada muestra envasada fue almacenada para que mantuvieran una temperatura aproximada de cuatro grados Celsius debido a la posible presencia de materia orgánica y conservarlas para su posterior análisis.

3.4 Etapa experimental de laboratorio

Se analizaron las muestras en el fluorómetro sin seguir un orden cronológico respecto al orden en que se tomaron, lo anterior por recomendación de los encargados del laboratorio, con la finalidad de no generar tendencias que pudieran afectar el valor de concentración del trazador.

Al término de la medición de cantidad de Rodamina wt, cada muestra se regresó a donde se almacenaban los botes para mantenerse a una temperatura de cuatro grados Celsius y posteriormente, al finalizar los 95 análisis, se almacenaron en un cuarto frío como prevención por cualquier posible pérdida o incongruencia de datos y poder realizar los análisis nuevamente.

Esta etapa fue realizada en los laboratorios del departamento de Eco-Materiales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

3.5 Procesamiento de datos

Una vez encontrado el pico de la longitud de onda con el fluorómetro en la etapa de calibración y convertido el valor de intensidad tomado, en concentración real con la ecuación, se procede a ajustar los valores de concentración. El ajuste consiste en acomodar los datos reales respecto al valor de concentración menor para obtener el valor real, restándolo a cada uno de los datos.

Lo anterior se efectuó para que la curva en el eje de concentración empiece desde cero, ya que sin este ajuste la primera muestra presentaría una cantidad de trazador considerable lo cual sería un dato erróneo.

Para establecer la comparación con el modelo tanques en serie, se sigue la metodología descrita por Scott Fogler y Frederick Hart (tabla 3.2) la cual establece los parámetros necesarios para desarrollar la función de tiempos de residencia del clarificador secundario analizado (Fogler, 2004; Hart, 1994).

Tabla 3.2. Parámetros del modelo tanques en serie

ANÁLISIS DE LA CURVA DE TRAZADOR EN EL CLARIFICADOR SECUNDARIO											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
t	dt	C(t)	Ave C	C(t)*dt	E(t)	t*E*dt	t^2*E(t)*dt	Q*c*dt	E(t)*dt	t*E(t)*dt	t^2*C(t)*dt
dato	ΔA	dato	(C2+C1)/2	D*B	D/ΣE	A*B*F	A^2*F*B	Q*E*3.6 /1000	B*F	A*J	A^2*E

En la cual:

t = tiempo

dt = diferencial de tiempo

$E(t)$ = Tiempos de distribución de residencia.

$C(t)$ = concentración de trazador

Q =Gasto

Diferentes autores consultados recomiendan la utilización de hojas de cálculo para el desarrollo matemático de este modelo, siendo las hojas de cálculo la más comúnmente utilizados (Scott Fogler, 2004; Metcalf & Eddy, 2003).

Una vez completados los valores de la tabla, se procedió a determinar la curva " $E(t)$ " o RTD por sus siglas en inglés (residence time distribution), graficando los datos correspondientes. Como complemento al comportamiento de la corriente, se obtiene la curva " $F(t)$ ", esta se determina graficando los datos resultantes de la función $E(t)$ acumulativa respecto al tiempo de la prueba.

El método del modelo tanques en serie se desarrolla encontrando las características que determinan el comportamiento hidráulico del clarificador estudiado. Siendo las fundamentales: el tiempo de retención del trazador, el tiempo de retención del clarificador y la fracción de zonas muertas presentes en el. Al igual el obtener características secundarias que complementan el experimento, tales

como: la cantidad de trazador que se recupera durante la prueba y el número de dispersión del clarificador secundario.

Obtenidos los datos anteriores, se aplicó la ecuación del modelo tanques en serie, esto se facilitó utilizando hojas de cálculo y estableciendo visualmente el número de tanques que representaron mejor al clarificador secundario analizado.

4. RESULTADOS Y DISCUCIÓN

Los resultados de la investigación tienen una particularidad única y aunque la metodología base de la experimentación, el proceso de estímulo-respuesta, se ha usado en repetidas ocasiones en diferentes procesos de plantas de tratamiento en el mundo. Las características de cada tanque analizado se refieren tanto a lo distintivo de la zona donde se encuentre la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), las características del afluente que llega a la planta, como también los criterios utilizados en el diseño, tales son la calidad como la cantidad.

El objetivo principal del trabajo está fundamentado en comprobar el funcionamiento del proceso analizado respecto al diseño y poder contrastarlo. De acuerdo con la literatura consultada, se detectó que el patrón a seguir en este tipo de investigaciones apunta a que no existe un diseño perfecto, si no que cada proceso en el tren de tratamiento se adapta a un funcionamiento propio según las características donde se tratan las aguas residuales, en este caso, Zuazua Nuevo León, el cual es un municipio que ha tenido un notable crecimiento poblacional en los últimos años.

4.1 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL FLUORÓMETRO

Para obtener un dato confiable se debe realizar la calibración, sin la realización de ésta no podemos tener un parámetro de concentración de Rodamina wt en las muestras tomadas en la experimentación, al tener una base de muestras con concentraciones preparadas se pueden interpretar de una manera efectiva. Ya que se busca ajustar la longitud de onda del trazador utilizado y establecer el mismo patrón para la búsqueda de datos.

Así mismo, el fluorómetro arrojó como resultados 2 tipos de conjunto de datos, primero, un archivo “.csv” (archivo de valores separados por coma) donde se conjuntan los valores de intensidad y longitud de onda de cada análisis realizado. Para el segundo tipo de datos, arrojó el mismo conjunto de datos representados en una gráfica, para interpretar el contraste de las concentraciones.

La figura 4.1, muestra en el eje horizontal la longitud de onda (nm) en que las partículas son excitadas por el fluorómetro, y en el eje vertical la intensidad de fotoluminiscencia (a.u.). Teniendo como el área clave a observar, los valores máximos de la curvatura de detección de la rodamina, segundo pico en la curva de izquierda a derecha. Este nos detalla la diferencia de concentraciones y por tanto, descarta el conjunto de picos restantes los cuales son los correspondientes al agua residual.

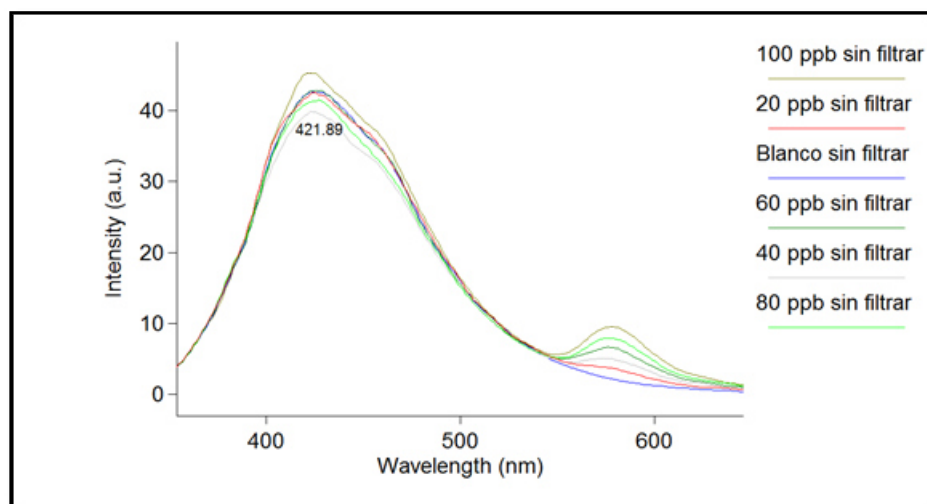


Figura 4.1. Gráfico de comparación de las corridas de las muestras a diferentes concentraciones para la calibración del fluorómetro.

Cabe resaltar que las muestras no están ordenadas por concentración en una secuencia creciente o decreciente ya que por recomendación de los operadores del laboratorio se analizaron al azar para no crear una posible tendencia en el fluorómetro, añadiendo al caso que el software del fluorómetro no permite acomodar el orden ya arrojados los resultados.

La longitud de onda seleccionada fue 575 nm, siendo un valor aproximado a los máximos presentados en la intensidad detectada, pasando a recolectar estos datos en un conjunto de valores de intensidades, asociados a las concentraciones controladas de Rodamina wt (tabla 4.1), generando una ecuación mediante la técnica de regresión lineal que se ajuste a dichos puntos (figura 4.2). Se tiene como finalidad asociar una ecuación que al interpretar la intensidad de la detección dé como resultado la concentración de trazador en las muestras de la experimentación.

Tabla 4.1. Datos de intensidad de cada muestra.

Etiqueta (concentración mg/m3)	Detección en laboratorio (intensidad a.u.)
20	3.5662
40	4.8791
60	6.7303
80	7.9674
100	9.8742

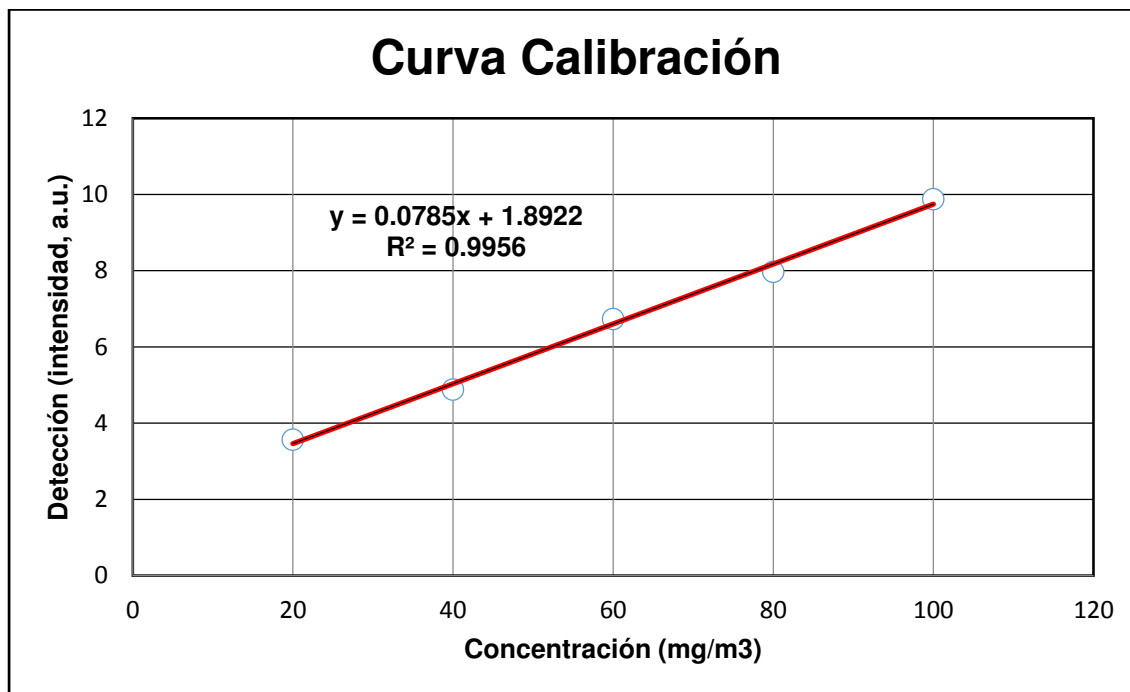


Figura 4.2. Curva de calibración.

La ecuación 5 determina la regresión para la calibración.

$$y = 0.0785x + 1.8922 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

y= Intensidad detectada en el fluorómetro, en a.u. (unidades de intensidad)

x= Concentración de trazador, en mg/m³

La ecuación de regresión cuenta con un coeficiente de determinación igual a $R^2 = 0.9956$, el cual establece la calidad del ajuste en la regresión, de 0 a 1, siendo el 1 un ajuste completo.

4.2 RESULTADOS DE LA ESTAPA EXPERIMENTAL DE CAMPO

El método estímulo-respuesta utilizado, presentó resultados visibles y como resultado de la parte experimental de campo se representa en la figura 4.3, la cual muestra cómo fue cambiando la tonalidad de las muestras recolectadas.



Figura 4.3. Cambio en la tonalidad del efluente por la concentración de la rodamina wt, se tomó una muestra representativa de las muestras recolectadas, 16 de 95.

La figura 4.3 tiene como finalidad establecer si el experimento realizado está siendo realizado correctamente, esto antes de realizar el análisis de cantidad de trazador. Representa visualmente el comportamiento de una curva “concentración contra tiempo” típica de un experimento estímulo-respuesta en la modalidad de inyección en pulso (Figura 4.4).

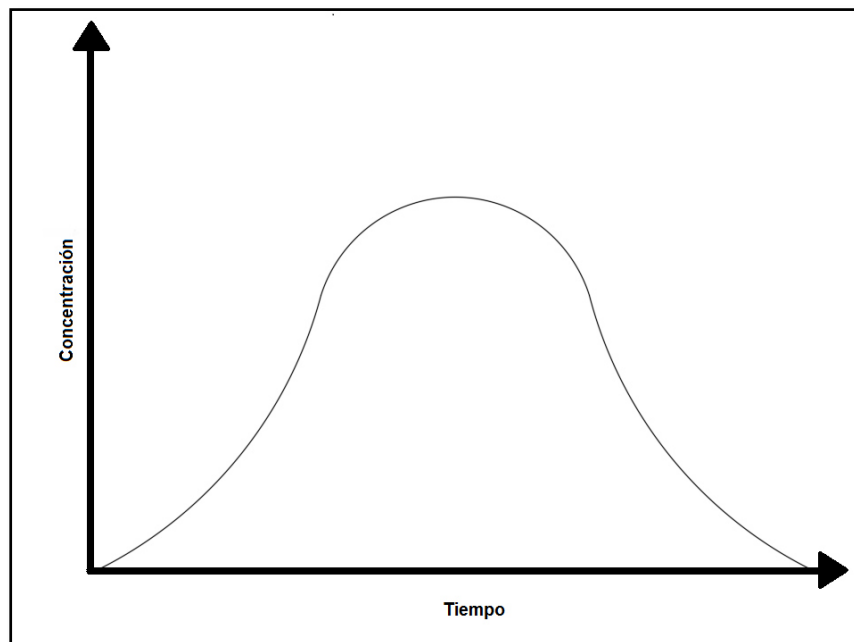


Figura 4.4. Respuesta típica del experimento estímulo-respuesta en la modalidad de inyección en pulso (Fogler, 2004).

Por otro lado, el agua a tratar del clarificador tomó un color rosado que se apreciaba notablemente, y que al paso del experimento, este se empezó a presentar en los dos clarificadores de la planta con una tonalidad menos fuerte debido a la recirculación presente en el proceso, el cual no afectó el desempeño de la planta debido a las características del trazador utilizado.

4.3 LABORATORIO Y GABINETE

De igual forma que se llevó a cabo la calibración, las muestras se analizaron aleatoriamente, esto por recomendación de los operadores debido a las instalaciones del laboratorio respecto a la cantidad de luz que entra a la habitación donde se encuentra el fluorómetro, lo anterior para no crear una posible tendencia en los resultados que afecten el desarrollo del experimento.

Una vez terminado los ensayos, se procedió a conjuntar los datos que responden a la longitud de onda seleccionada en la calibración, teniendo como resultado el conjunto de valores mostrados en la tabla 4.2, la cual cuenta con dos columnas, la del lado izquierdo el número de muestra referente al tiempo que se tomó y la del lado derecho la intensidad reflejada en el análisis.

Tabla 4.2. Datos de intensidad de fotoluminiscencia medida por fluorómetro de cada muestra.

No. Muestra	Intensidad (nm)	No. Muestra	Intensidad (nm)	No. Muestra	Intensidad (nm)	No. Muestra	Intensidad (nm)
1	2.7469	25	10.6406	49	7.9890	73	3.8753
2	2.9009	26	11.6468	50	8.4012	74	3.9514
3	2.5880	27	11.0252	51	7.9453	75	3.8520
4	2.6340	28	10.8662	52	6.8076	76	3.5601
5	2.6742	29	10.2315	53	7.3896	77	3.6868
6	2.5711	30	10.5724	54	6.9843	78	3.8772
7	2.8615	31	11.1928	55	6.8134	79	3.8818
8	2.7640	32	10.0308	56	6.3353	80	3.5405
9	2.8836	33	10.8382	57	5.9789	81	3.5642
10	2.9777	34	10.5619	58	5.3132	82	3.6867
11	2.9007	35	10.0089	59	5.1623	83	3.5399
12	3.3796	36	10.5853	60	5.2181	84	3.4875
13	4.8791	37	10.1349	61	5.0107	85	3.3637
14	4.7574	38	10.2636	62	4.6142	86	3.1663
15	6.0505	39	9.2678	63	4.5925	87	3.2072
16	7.0009	40	9.9564	64	4.6578	88	2.9762
17	7.0240	41	9.4487	65	4.1499	89	3.1320
18	8.6060	42	9.5807	66	3.9135	90	3.2323
19	9.0181	43	9.6460	67	4.0901	91	3.3412
20	9.0086	44	9.0742	68	4.0408	92	3.1643
21	9.7597	45	9.2966	69	4.1883	93	3.0518
22	10.1445	46	9.6211	70	3.9743	94	3.1070
23	10.7995	47	8.8027	71	4.0264	95	2.8609
24	10.8218	48	8.1148	72	3.6530		

La intensidad medida en el fluorómetro para cada muestra, deriva en determinar la concentración de trazador presente en ella y al aplicar lo determinado en la calibración, se realizó el ajuste al valor menor (2.5711 nm), pudiendo llegar a los valores presentados en la tabla 4.3, los cuales representan la concentración real medida.

Tabla 4.3. Datos de concentración de cada muestra.

No. Muestra	Concentración mg/m ³	No. Muestra	Concentración mg/m ³	No. Muestra	Concentración mg/m ³
1	0	33	105.3129	65	20.1112
2	0	34	101.7926	66	17.0996
3	0	35	94.7490	67	19.3501
4	0	36	102.0911	68	18.7214
5	0	37	96.3534	69	20.6007
6	0	38	97.9937	70	17.8740
7	3.6991	39	85.3074	71	18.5378
8	2.4572	40	94.0793	72	13.7821
9	3.9810	41	87.6122	73	16.6132
10	5.1794	42	89.2939	74	17.5834
11	4.1983	43	90.1250	75	16.3165
12	10.2993	44	82.8418	76	12.5979
13	29.4012	45	85.6742	77	14.2126
14	27.8504	46	89.8089	78	16.6377
15	44.3234	47	79.3834	79	16.6969
16	56.4297	48	70.6193	80	12.3479
17	56.7240	49	69.0175	81	12.6508
18	76.8769	50	74.2688	82	14.2108
19	82.1269	51	68.4610	83	12.3406
20	82.0058	52	53.9681	84	11.6733
21	91.5737	53	61.3812	85	10.0957
22	96.4762	54	56.2181	86	7.5818
23	104.8193	55	54.0409	87	8.1021
24	105.1039	56	47.9514	88	5.1599
25	102.7956	57	43.4111	89	7.1442
26	115.6134	58	34.9301	90	8.4223
27	107.6952	59	33.0088	91	9.8099
28	105.6695	60	33.7186	92	7.5562
29	97.5836	61	31.0771	93	6.1227
30	101.9264	62	26.0262	94	6.8257
31	109.8297	63	25.7499	95	3.6909
32	95.0271	64	26.5813		

Los datos de concentración de Rodamina wt y tiempo generan la curva “C (t)”, concentración vs tiempo, la cual se presenta en la figura 4.5. Se observa que la forma que toma la curva es similar a la “RTD”, difiriendo en los valores del eje vertical debido a las unidades que maneja cada una.

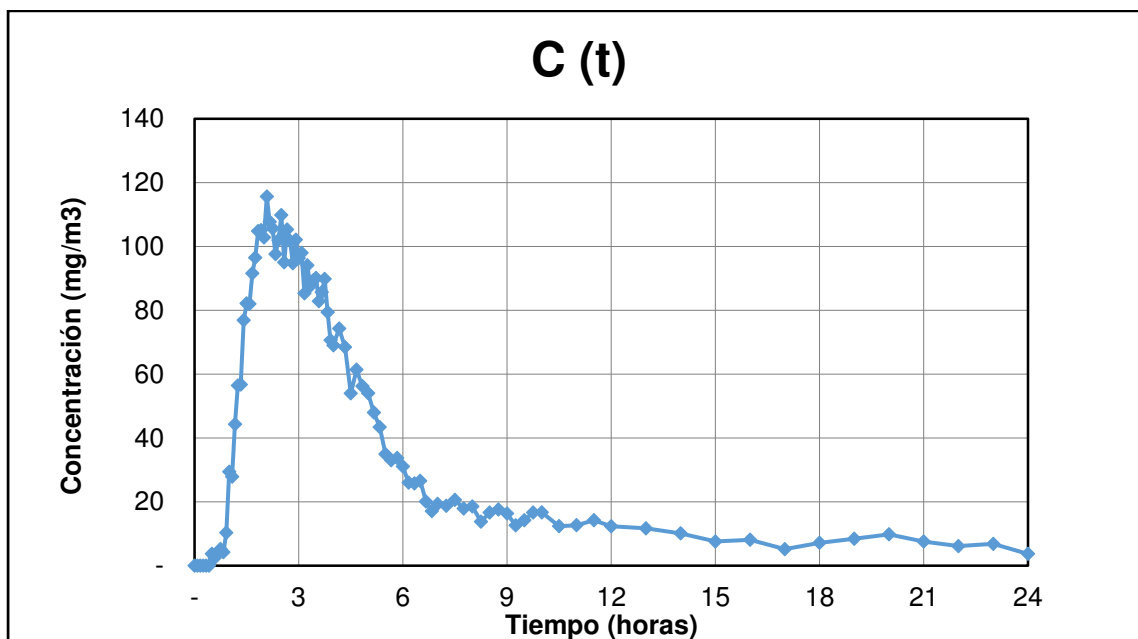


Figura 4.5. Curva “C (t)” del experimento realizado al clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.

Para la determinación de la curva RTD del clarificador secundario se presenta a continuación en la tabla 4.4. La cual es un resumen del procedimiento para encontrar características del clarificador que nos ayudan a analizar el comportamiento (ver tabla completa en anexos). Cada columna determina un parámetro para la determinación de la curva “E (t)”. La tercera fila indica cómo obtener el valor de cada columna.

Tabla 4.4. Resumen de la hoja de cálculo utilizada en el procedimiento para encontrar las características del clarificador secundario analizado.

Análisis de la curva de trazador en el clarificador secundario											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
t	dt	C(t)	Ave C	C(t)*dt	E(t)	t*E*dt	t^2*E(t)*dt	Q*c*dt	E(t)*dt	t*E(t)*dt	t^2*C(t)*dt
dato	ΔA	dato	$(C_2+C_1)/2$	D*B	D/ ΣE	A*B*F	A^2*F*B	Q*E*3.6 /1000	B*F	A*J	A^2*E
	$\Sigma=24$		$\Sigma=4311.14$	$\Sigma=566.38$	$\Sigma=7.61$	$\Sigma=6.72$	$\Sigma=78.94$	$\Sigma=112.14$	$\Sigma=1$	$\Sigma=6.72$	$\Sigma=44709.7$

Con estos datos se obtiene la curva “E (t)” de la función RTD del clarificador secundario analizado, graficando los valores de las columnas A y F de la base de cálculo (figura 4.6). Se observa a simple vista que la curva no presenta picos notables extraños a un comportamiento típico de curva “E (t)” en un experimento en pulso, siendo negativa la presencia de un corto circuito severo en el clarificador analizado, lo cual significa que el clarificador trabaja bajo diseño hidráulicamente.

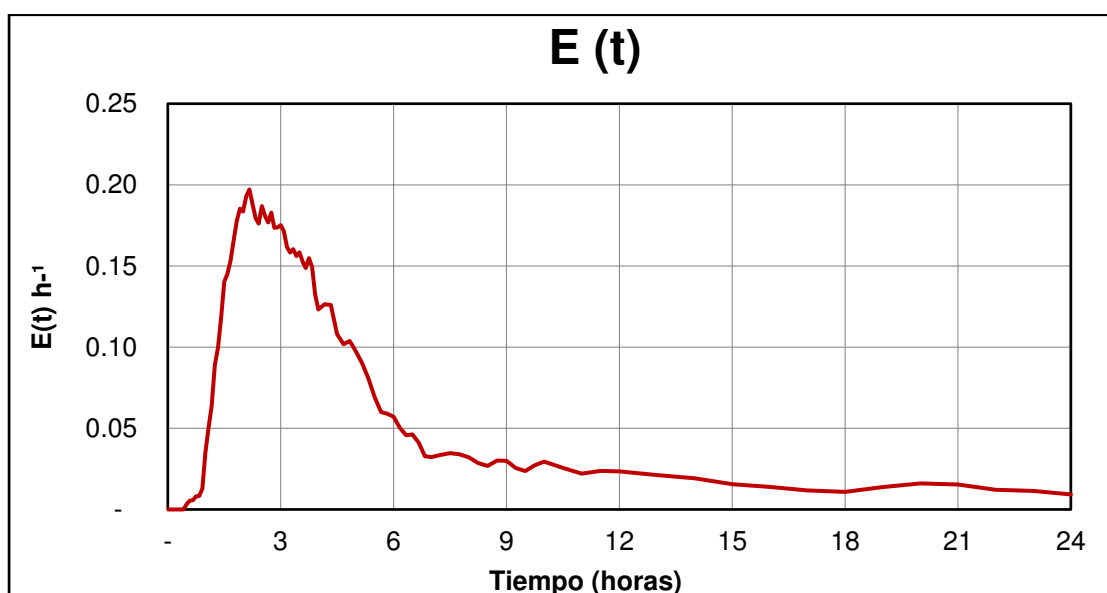


Figura 4.6. Curva de distribución de tiempos de residencia (RTD) del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.

La tabla presentada a continuación (tabla 4.5), muestra los datos para determinar los valores del eje vertical de la curva $F(t)$, teniendo en la columna de la izquierda los valores de la columna J de la tabla 4.4, mientras que en la columna de la derecha presentan el resultado de la acumulación de los datos antes mencionados. Al graficarlo con respecto al tiempo de experimentación da como resultado la Figura 4.7, representando el comportamiento acumulativo del trazador en el clarificador respecto al tiempo.

Tabla 4.5. Datos para el eje vertical de la curva $F(t)$.

$E(t) \cdot dt$	Acumulación	$E(t) \cdot dt$	Acumulación	$E(t) \cdot dt$	Acumulación
-	-	0.01	0.26	0.01	0.68
-	-	0.02	0.28	0.01	0.69
-	-	0.01	0.29	0.01	0.69
-	-	0.01	0.3	0.01	0.7
-	-	0.01	0.32	0.01	0.71
-	-	0.01	0.33	0.01	0.72
0	0	0.01	0.35	0.01	0.73
0	0	0.01	0.36	0.01	0.73
0	0	0.01	0.37	0.01	0.74
0	0	0.01	0.39	0.01	0.75
0	0	0.01	0.4	0.01	0.76
0	0	0.01	0.41	0.01	0.76
0	0.01	0.01	0.43	0.01	0.77
0	0.01	0.01	0.44	0.01	0.77
0.01	0.02	0.01	0.45	0.01	0.78
0.01	0.02	0.01	0.46	0.01	0.79
0.01	0.03	0.01	0.47	0.01	0.81
0.01	0.04	0.02	0.49	0.01	0.82
0.01	0.05	0.02	0.51	0.01	0.83
0.01	0.07	0.02	0.53	0.02	0.85
0.01	0.08	0.02	0.55	0.02	0.87
0.01	0.09	0.02	0.57	0.02	0.89
0.01	0.11	0.02	0.58	0.01	0.9
0.02	0.12	0.02	0.6	0.01	0.91
0.02	0.14	0.01	0.61	0.01	0.92
0.02	0.15	0.01	0.62	0.01	0.94
0.02	0.17	0.01	0.63	0.02	0.95
0.02	0.19	0.01	0.64	0.02	0.97
0.01	0.2	0.01	0.65	0.01	0.98
0.01	0.22	0.01	0.66	0.01	0.99
0.02	0.23	0.01	0.67	0.01	1
0.02	0.25	0.01	0.68		

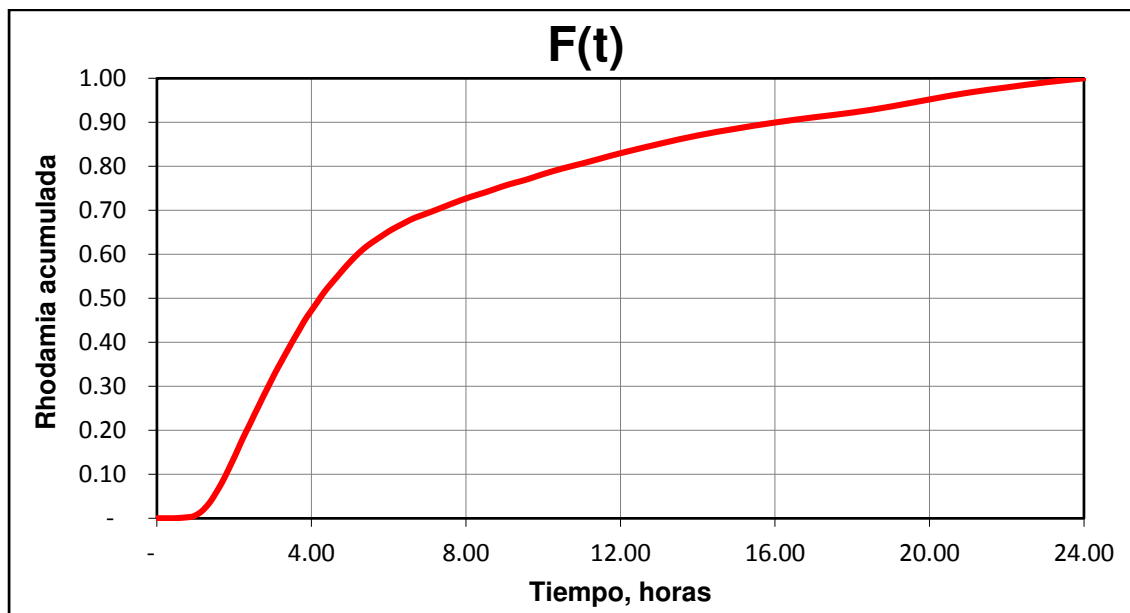


Figura 4.7. Curva “F (t)” del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.

Las características del clarificador secundario estudiado se presentan en la tabla 4.6 como un resumen de las hojas de cálculo en el análisis realizado.

Se obtuvo un tiempo de retención del trazador de 6.72 horas, mientras que el tiempo de retención del clarificador es de 7.22 horas. Esto nos lleva a obtener un porcentaje de zonas muertas de 7%, siendo este una muy buena fracción de zonas muertas para un clarificador secundario.

Otro resultado fue el porcentaje de trazador recuperado, teniendo un 60.8% del total aplicado, esto se debió a dos cosas: el volumen en el retorno de lodos al sistema de lodos activados y que las muestras fueron tomadas en el afluente del clarificador analizado. Si las muestras se toman en un punto donde los afluentes de los clarificadores se juntan (Figura 4.8), este porcentaje resultaría mayor.

Tabla 4.6. Tabla de resumen de datos característicos del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua.

Resumen del análisis de las pruebas de trazador	
Datos generales de la prueba de trazador	
Flujo promedio, LPS (Dato)	55.00
Tiempo de retención (trazador), h	6.72
Número de dispersión (d)	0.324
Fracción de zonas muertas, %	7.0
Datos del tanque	
N° celdas (Dato)	1.00
Diámetro, m (Dato)	21.34
Tirante, m (Dato)	4.00
Volumen, m3	1,430.13
Tiempo teórico de retención, h	7.22
Cantidad de trazador recuperado	
Volumen de Rodamina WT aplicada, ml (Dato)	750.00
Gravedad específica Rodamina WT (Dato)	1.15
Concentración certificada, % (Dato)	21.38
Masa de Rodamina WT aplicada, g	184.40
Masa de Rodamina recuperada, g	112.14
Recuperación, %	60.8

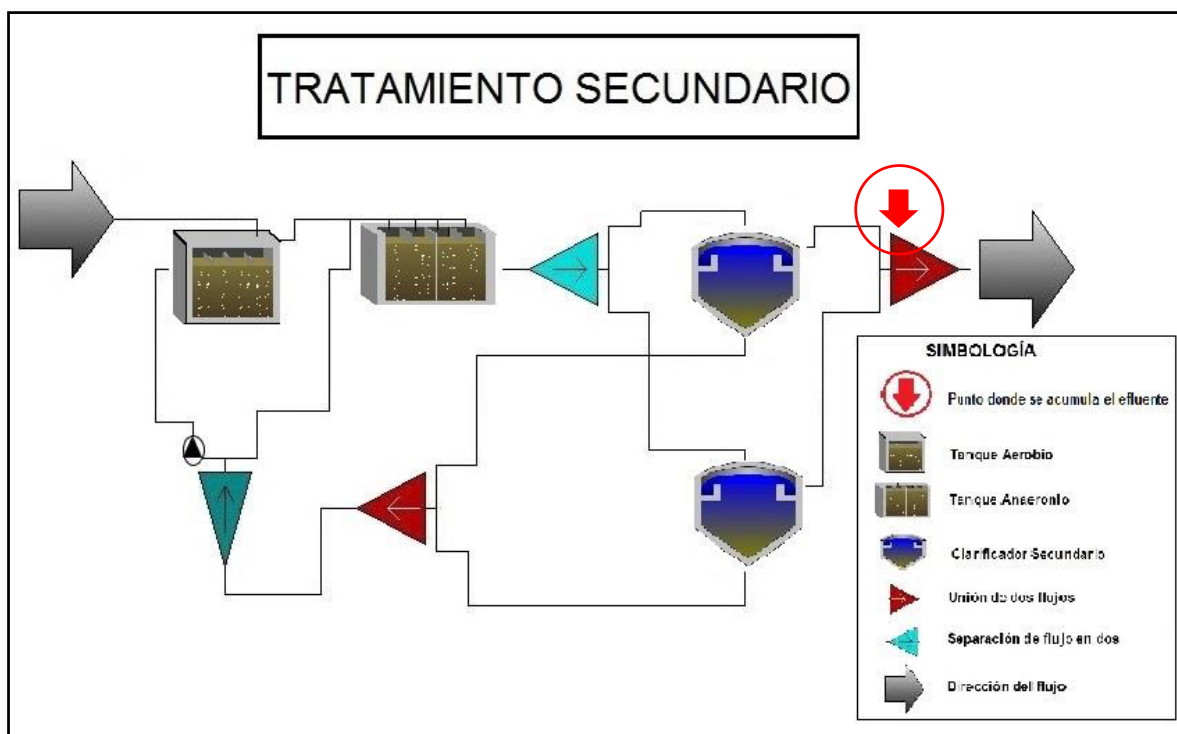


Figura 4.8. Punto donde se juntan los afluentes de los clarificadores.

Con respecto al valor de dispersión se obtuvo un valor de 0.324, este refiere al modelo de dispersión, el cual no se desarrolla en la investigación pero que sirve como una base para el análisis del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua. Este resultado, da a entender que existe una alta dispersión de las partículas lo cual representa un comportamiento deseable en el tanque.

En la figura 4.9 se presentan los resultados cuando se aplica el modelo de dispersión, observando el amplio parecido entre la curva $E(t)$ resultante de la investigación y la curva referente a una alta dispersión, teniendo en cuenta que los dos modelos parten de la curva RTD.

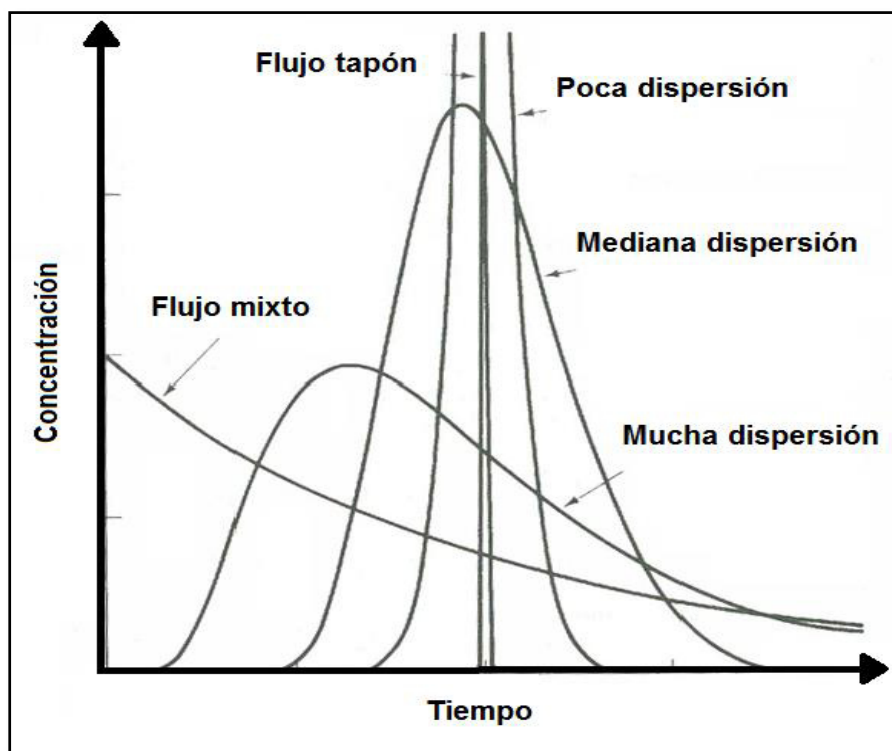


Figura 4.9. Comportamiento del modelo de dispersión (Fogler, 2004).

Por último, el ajuste del modelo tanques en serie se realizó por tanteos hasta que la curva " $E(t)$ " real y la " $E(n)$ " del modelo coincidan visualmente. Para el caso del clarificador secundario norte de la PTAR Zuazua el modelo se ajustó a 10 tanques en serie, la tabla 4.7 muestra los datos para la realización de las curvas " $E(t)$ " y " $E(n)$ " y poder compararlas para la realización del ajuste (figura 4.10).

Estos 10 tanques en serie, representan 10 tanques con flujo perfecto conectados en serie. Teóricamente entre más tanques en serie, más tiempo de retención tendrá el tanque real. La figura 4.11 nos ayuda a observar la congruencia de resultados entre la curva RTD encontrada y la curva del modelo tanques en serie.

Tabla 4.7. Tabla de datos para el ajuste del modelo tanques en serie.

MODELO TANQUES EN SERIE			MODELO TANQUES EN SERIE			MODELO TANQUES EN SERIE		
t	E(t)	E(n)	t	E(t)	E(n)	t	E(t)	E(n)
horas	medido	modelado		medido	modelado		medido	modelado
0	0	0	2.67	0.177	0.019	6.67	0.041	0.188
0.08	0	0	2.75	0.183	0.022	6.83	0.033	0.183
0.17	0	0	2.83	0.174	0.025	7	0.032	0.177
0.25	0	0	2.92	0.174	0.029	7.25	0.034	0.168
0.33	0	0	3	0.175	0.033	7.5	0.035	0.157
0.42	0	0	3.08	0.172	0.038	7.75	0.034	0.145
0.5	0.003	0	3.17	0.162	0.042	8	0.032	0.133
0.58	0.005	0	3.25	0.158	0.047	8.25	0.029	0.121
0.67	0.006	0	3.33	0.16	0.052	8.5	0.027	0.109
0.75	0.008	0	3.42	0.156	0.058	8.75	0.03	0.098
0.83	0.008	0	3.5	0.158	0.063	9	0.03	0.087
0.92	0.013	0	3.58	0.153	0.069	9.25	0.026	0.077
1	0.035	0	3.67	0.149	0.075	9.5	0.024	0.067
1.08	0.051	0	3.75	0.155	0.081	9.75	0.027	0.058
1.17	0.064	0	3.83	0.149	0.087	10	0.029	0.051
1.25	0.089	0	3.92	0.132	0.094	10.5	0.026	0.037
1.33	0.1	0	4	0.123	0.1	11	0.022	0.027
1.42	0.118	0	4.17	0.126	0.113	11.5	0.024	0.019
1.5	0.14	0.001	4.33	0.126	0.125	12	0.023	0.013
1.58	0.145	0.001	4.5	0.108	0.137	13	0.021	0.006
1.67	0.153	0.001	4.67	0.102	0.148	14	0.019	0.003
1.75	0.166	0.002	4.83	0.104	0.159	15	0.016	0.001
1.83	0.178	0.002	5	0.097	0.168	16	0.014	0
1.92	0.185	0.003	5.17	0.09	0.176	17	0.012	0
2	0.184	0.004	5.33	0.081	0.183	18	0.011	0
2.08	0.193	0.005	5.5	0.069	0.188	19	0.014	0
2.17	0.197	0.006	5.67	0.06	0.192	20	0.016	0
2.25	0.188	0.008	5.83	0.059	0.195	21	0.015	0
2.33	0.179	0.009	6	0.057	0.196	22	0.012	0
2.42	0.176	0.011	6.17	0.05	0.196	23	0.011	0
2.5	0.187	0.014	6.33	0.046	0.194	24	0.009	0
2.58	0.181	0.016	6.5	0.046	0.191			

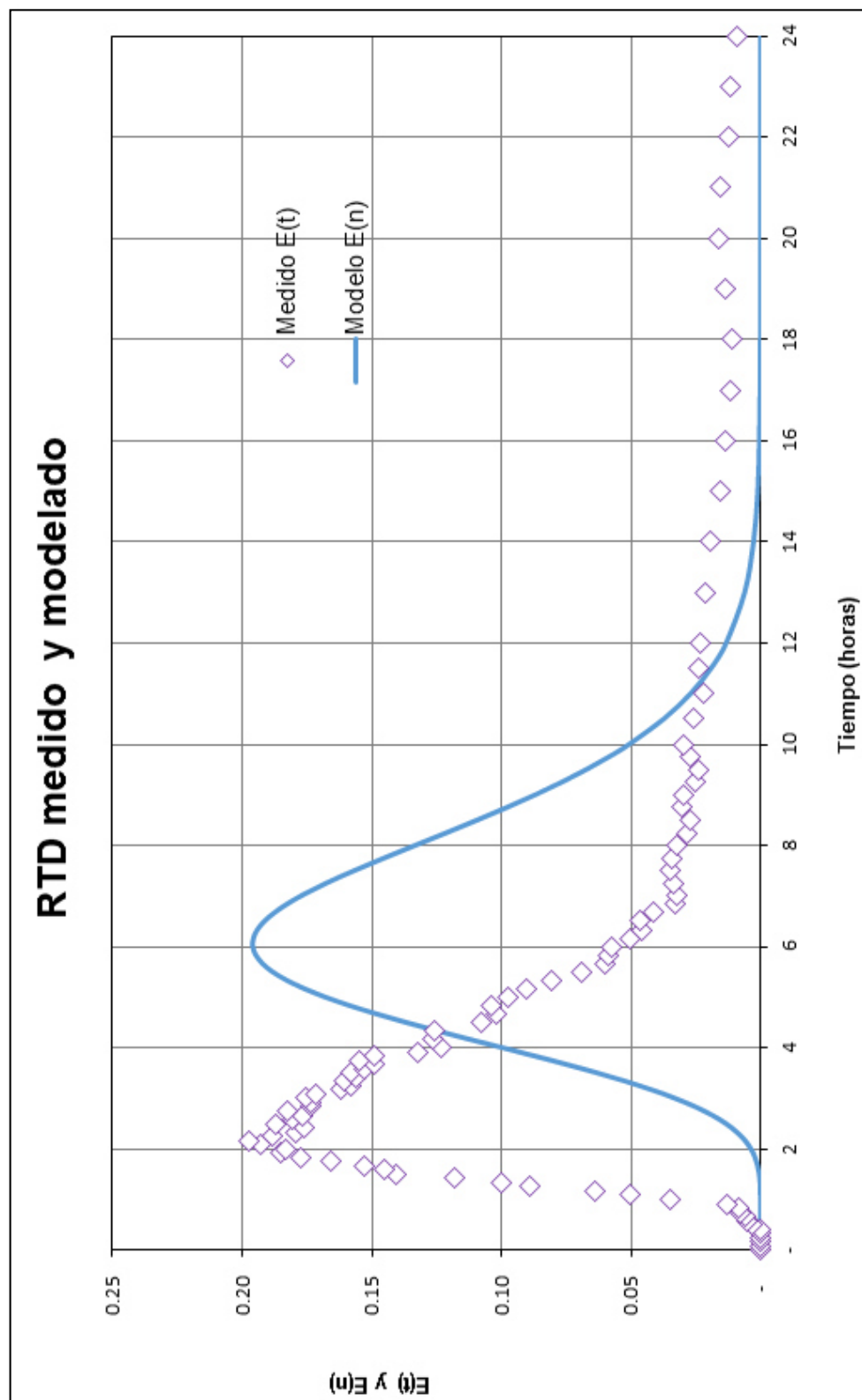


Figura 4.10. Curvas de comparación de RTD medido y modelado.

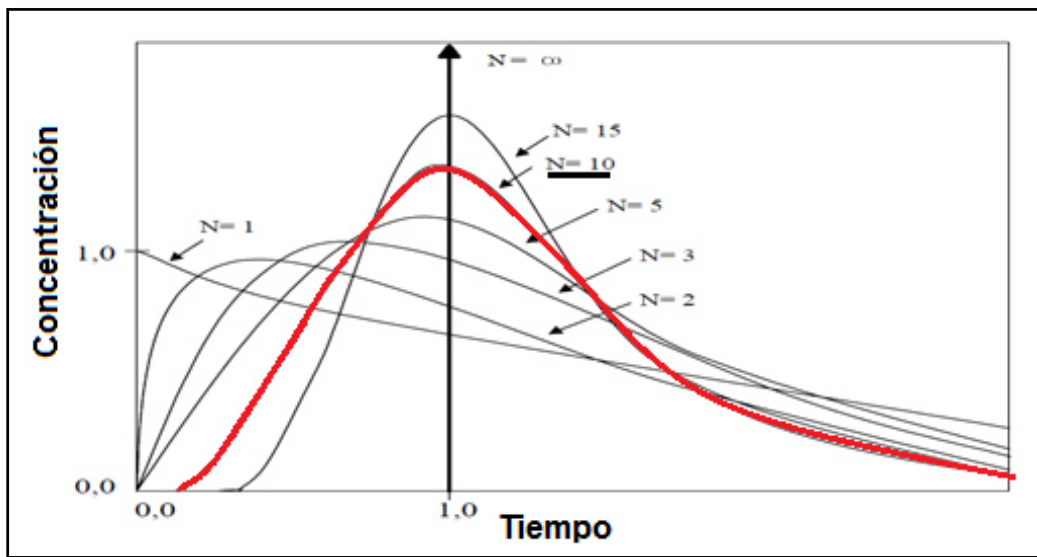


Figura 4.11. Comportamiento del modelo tanques en serie, donde: N = número de tanques en serie.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El método estímulo-respuesta utilizado en la investigación resultó una forma adecuada para desarrollar la hidrodinámica del clarificador estudiado. Al establecer variables que se ajustaron a las características de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Zuazua así como los insumos a los que se tuvieron acceso, entre los más determinantes, la Rodamina WT como trazador y el fluorómetro como el equipo para detectarlo.
2. El tiempo de residencia del clarificador estudiado determinó un correcto funcionamiento del mismo, debido a que se logró establecer que no existen cortos circuitos y zonas muertas, los cuales son factores que se deben minimizar en una planta con el fin de lograr una mayor eficiencia en el tratamiento.
3. De acuerdo con los resultados, el clarificador secundario trabaja bajo condiciones eficientes; en un sentido de mejora a la planta y que este se tome en cuenta para diseñar, el que el afluente no esté regulado contribuye a generar un mayor número de zonas muertas en diversas partes del tren de tratamiento. También, durante la experimentación de campo, el tratamiento primario contaba con una falla generando que no funcionara correctamente y pasando en ocasiones por las rejillas partículas de cierto tamaño, por ejemplo semillas.

Por otro lado, en un punto de vista ambiental, la temperatura durante la experimentación no varía considerablemente durante la fase de toma de muestras, descartando así este factor respecto a lo revisado en la literatura.

4. Los tiempos teóricos y reales establecidos en la investigación, dan a una respuesta de análisis en los factores que generen una mejor eficiencia tanto del clarificador y como consecuencia de la planta. Este factor se deduce por lo observado en la planta y el contraste de resultan, que lo principal es el gasto de entrada a la planta y que este debe ser regulado con la implementación de un tanque estabilizador de flujos, debido a picos extremos. El no implementar un afluente constante está ligado a que la planta daba abasto a una población pequeña, que al paso de los años está creciendo considerablemente al punto de que la planta actualmente se encuentra en una etapa de ampliación (Imagen satelital del avance de construcción de la ampliación en anexos).
5. El fundamentar lo encontrado con la curva de “RTD” resultó de una manera práctica el utilizar modelos matemáticos que expliquen las variables de comportamiento, en el caso de la investigación presente, el desarrollo del modelo tanques en serie y la comparación entre los resultados de los modelos tanques en serie y dispersión, avalan la eficiencia encontrada en el funcionamiento del clarificador. Cabe resaltar, que no existe un número de tanques en serie o un número de dispersión ideal, el poder tener una tendencia media entre sus extremos (flujo pistón y flujo tapón) es lo que fomenta a que el

clarificador trabaje eficientemente haciendo que se genere un lodo debido a la sedimentación y que el afluente resulte clarificado.

Finalmente, se establece una metodología para la revisión del comportamiento hidráulico en un clarificador secundario de una PTAR, dejando un precedente para la implementación de dicha práctica en otras plantas de funcionamiento similar, con el fin de identificar posibles anomalías presentes en la hidrodinámica, establecer qué factores influyen y formular recomendaciones para contrarrestar dichas anomalías.

RECOMENDACIONES

- Construir la instalación de un tanque regulador de afluentes, para control de picos horarios.
- Tener en una constante revisión y mantenimiento los diferentes trenes de tratamiento para evitar generar efectos negativos que dispersen la calidad del efluente.
- Se debe realizar la experimentación estímulo-respuesta en dos ocasiones durante el año (verano e invierno) y comparar los resultados obtenidos para determinar si el factor ambiental, en especial la temperatura, es crucial en el trastorno hidrodinámico de la PTAR.
- Tener un mayor énfasis en la proyección de gastos para diseño de plantas de tratamiento, tomando en cuenta que se desconoce el crecimiento poblacional y por ende el crecimiento en el flujo de entrada donde se encuentre la planta a diseñar.

BIBLIOGRAFÍA

Ardern, E., & Lockett, W. (1914). Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. Journal of the Society of Chemical Industry, Vol 33, No 10.

Arroyane Gómez, D., González Arteaga, M., Gallego Suárez, D. (2005). Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor UASB utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas.

BENTOS (2007). Metodologías utilizadas en estudios de dispersión: elección del mejor trazador químico. Informe técnico, Servicios y Equipos Marinos LTDA.

CEPIS (2005). Tratamiento de agua para consumo humano. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Cunill, F., Iborra, M., Tejero, J. (2010). Reactores Químicos. Manual de la Universidad de Barcelona.

De Clercq, B., Coen, F., Vanderhaegen, B., Vanrolleghem, P. (1999). Calibrating simple models for mixing and flow propagation in waste water treatment plants. Wat Sci Tech.

DOF, Diario Oficial de la Federación (01-06-1997). Norma Oficial Mexicana NPM-001-SEMARNAT-1996. Norma que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

DOF, Diario Oficial de la Federación (17-07-1998). Norma Oficial Mexicana NPM-003-SEMARNAT-1997. Norma que establece los límites máximos

permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Echavarría, M., Orozco, G., Pérez, A. (2012). Comportamiento del nivel de líquido en un sistema de dos tanques en serie.

Fall, C., & Loaiza, J. (2008). Calibración hidráulica a escala real de un reactor de lodos activados. Ingeniería hidráulica en México.

Flores, A., Loaiza, J., Fall, C. (2008). Aquasim as a presimulation tool of tracer test at full scale WWTP. CIRA, Universidad Autónoma del Estado de México.

Fall, C., Loaiza, J., Esparza, M., Martínez, L. (2007). Evaluación de un clarificador secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales. Revista Ingenierías.

Gallego, D., Osorio, J., Ramírez, E. (2008). Evaluación del diseño de un sedimentador secundario para lodo activo. Universidad Nacional de Colombia. Ingeniería Química, No, 462.

Giacoman Vallejos, G., Frías Tuyín, J., Hurtado Franco, F., Coronado Peraza, V., Méndez Novelo, R. (2003). Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. Revista Ingeniería.

Hart, F. (1994). Tracer analysis of a final clarifier and a chlorine contact chamber. The AWWARF Tracer Study Workshop.

INEGI (2010). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 Nuevo León.

- Levienspiel, O. (2004). Ingeniería de las reacciones químicas. Limusa, tercera edición. Limusa, 2004.
- Loaiza Navia, J., & Fall, C. (2010). Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Apodaca, N.L. Ciencia UANL.
- Nanning, J. (2003). Sedimentación secundaria en sistemas de lodos activados. AKROS.
- Majewsky, M., Gallé, T., Bayerle, M., Goel, R., Fischer, K., Vanrolleghem, P. (2011). Xenobiotic removal efficiencies in wastewater treatment plants: Residence time distributions as a guiding principle for sampling strategies. Water research 45.
- Marín Escalona, L. (2007). Determinación experimental de la distribución de tiempos de residencia en un estanque agitado con pulpa. METSOLVER.
- Martín Domínguez, A., Tzatchkov, V., Escalante Mercado, J. (2001). Modelación del flujo en unidades de tratamiento de agua potable. IMTA.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse McGraw-Hill, fourth edition.
- Patiño, P., Cruz, C., Torres, P., Laín, S. (2012). Hydrodynamic evaluation of a hydraulic clarifier through hydraulic behaviour indicators and simplified flow models. Ingeniería e investigación vol. 32 no. 1.
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Evaluation of hydrodynamic behavior as a tool to optimize anaerobic reactors of attached growth. Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

- Reichert, P. (1998). User manual of AQUASIM. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (EAWAG)
- Rojas, A., & García, A. (2010). Análisis de la curva de distribución del tiempo de residencia en un sistema de lixiviación. Tecnología química, vol. XXX.
- Sánchez, J., & Cardona, S. (2009). Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de pequeña escala. UNC, Medellin.
- Scott Fogler, H, (2004). Elements of chemical reaction engineering. Prentice Hall PTR, Fourth Edition.
- Smith, J. (1991). Ingeniería de la cinética química. McGraw-Hill, Tercera Edición.
- UAM, Ingeniería Química (2007). Flujo no ideal, batería de tanques en serie. Manual Universidad Autónoma de Madrid.
- Valdéz, E., & Vázquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA.
- Vesilind, A. (1968). Design of prototype thickeners from batch settling tests. Water Sewage Works 115.

ANEXOS

Tabla A.1 Análisis de la curva de trazador en el clarificador.

ANÁLISIS DE LA CURVA DE TRAZADOR EN EL CLARIFICADOR											
t	dt	C(t)	Ave C	C(t)*dt	E(t)	tE*dt	t^2E*dt	Q*c*dt	E(t)*dt	t'E(t)*dt	t^2C(t)*dt
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.0833	0.0833	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.1667	0.0833	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.2500	0.0833	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.3333	0.0833	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4167	0.0833	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5000	0.0833	3.6991	1.8495	0.1541	0.0033	0.0001	0.0001	0.0305	0.0003	0.0001	0.0385
0.5833	0.0833	2.4572	3.0781	0.2565	0.0054	0.0003	0.0002	0.0508	0.0005	0.0003	0.0873
0.6667	0.0833	3.9810	3.2191	0.2683	0.0057	0.0003	0.0002	0.0531	0.0005	0.0003	0.1192
0.7500	0.0833	5.1794	4.5802	0.3817	0.0081	0.0005	0.0004	0.0756	0.0007	0.0005	0.2147
0.8333	0.0833	4.1983	4.6888	0.3907	0.0083	0.0006	0.0005	0.0774	0.0007	0.0006	0.2713
0.9167	0.0833	10.2993	7.2488	0.6041	0.0128	0.0010	0.0009	0.1196	0.0011	0.0010	0.5076
1.0000	0.0833	29.4012	19.8502	1.6542	0.0350	0.0029	0.0029	0.3275	0.0029	0.0029	1.6542
1.0833	0.0833	27.8504	28.6258	2.3855	0.0505	0.0046	0.0049	0.4723	0.0042	0.0046	2.7996
1.1667	0.0833	44.3234	36.0869	3.0072	0.0637	0.0062	0.0072	0.5954	0.0053	0.0062	4.0932
1.2500	0.0833	56.4297	50.3766	4.1980	0.0889	0.0093	0.0116	0.8312	0.0074	0.0093	6.5595
1.3333	0.0833	56.7240	56.5769	4.7147	0.0999	0.0111	0.0148	0.9335	0.0083	0.0111	8.3818
1.4167	0.0833	76.8769	66.8004	5.5667	0.1179	0.0139	0.0197	1.1022	0.0098	0.0139	11.1721
1.5000	0.0833	82.1269	79.5019	6.6252	0.1404	0.0175	0.0263	1.3118	0.0117	0.0175	14.9066
1.5833	0.0833	82.0058	82.0663	6.8389	0.1449	0.0191	0.0303	1.3541	0.0121	0.0191	17.1446
1.6667	0.0833	91.5737	86.7897	7.2325	0.1532	0.0213	0.0355	1.4320	0.0128	0.0213	20.0902
1.7500	0.0833	96.4762	94.0249	7.8354	0.1660	0.0242	0.0424	1.5514	0.0138	0.0242	23.9959
1.8333	0.0833	104.8193	100.6478	8.3873	0.1777	0.0271	0.0498	1.6607	0.0148	0.0271	28.1907
1.9167	0.0833	105.1039	104.9616	8.7468	0.1853	0.0296	0.0567	1.7319	0.0154	0.0296	32.1324
2.0000	0.0833	102.7956	103.9498	8.6625	0.1835	0.0306	0.0612	1.7152	0.0153	0.0306	34.6499
2.0833	0.0833	115.6134	109.2045	9.1004	0.1928	0.0335	0.0697	1.8019	0.0161	0.0335	39.4982
2.1667	0.0833	107.6952	111.6543	9.3045	0.1971	0.0356	0.0771	1.8423	0.0164	0.0356	43.6796
2.2500	0.0833	105.6695	106.6823	8.8902	0.1884	0.0353	0.0795	1.7603	0.0157	0.0353	45.0066
2.3333	0.0833	97.5836	101.6266	8.4689	0.1794	0.0349	0.0814	1.6768	0.0150	0.0349	46.1083
2.4167	0.0833	101.9264	99.7550	8.3129	0.1761	0.0355	0.0857	1.6460	0.0147	0.0355	48.5497
2.5000	0.0833	109.8297	105.8780	8.8232	0.1869	0.0389	0.0974	1.7470	0.0156	0.0389	55.1448
2.5833	0.0833	95.0271	102.4284	8.5357	0.1808	0.0389	0.1006	1.6901	0.0151	0.0389	56.9639
2.6667	0.0833	105.3129	100.1700	8.3475	0.1769	0.0393	0.1048	1.6528	0.0147	0.0393	59.3600
2.7500	0.0833	101.7926	103.5528	8.6294	0.1828	0.0419	0.1152	1.7086	0.0152	0.0419	65.2598
2.8333	0.0833	94.7490	98.2708	8.1892	0.1735	0.0410	0.1161	1.6215	0.0145	0.0410	65.7413
2.9167	0.0833	102.0911	98.4201	8.2017	0.1738	0.0422	0.1232	1.6239	0.0145	0.0422	69.7712
3.0000	0.0833	96.3534	99.2223	8.2685	0.1752	0.0438	0.1314	1.6372	0.0146	0.0438	74.4167
3.0833	0.0833	97.9937	97.1736	8.0978	0.1716	0.0441	0.1359	1.6034	0.0143	0.0441	76.9853
3.1667	0.0833	85.3074	91.6506	7.6375	0.1618	0.0427	0.1352	1.5122	0.0135	0.0427	76.5876
3.2500	0.0833	94.0793	89.6934	7.4744	0.1584	0.0429	0.1394	1.4799	0.0132	0.0429	78.9488
3.3333	0.0833	87.6122	90.8458	7.5705	0.1604	0.0446	0.1485	1.4990	0.0134	0.0446	84.1164
3.4167	0.0833	89.2939	88.4530	7.3711	0.1562	0.0445	0.1519	1.4595	0.0130	0.0445	86.0472
3.5000	0.0833	90.1250	89.7094	7.4758	0.1584	0.0462	0.1617	1.4802	0.0132	0.0462	91.5784
3.5833	0.0833	82.8418	86.4834	7.2069	0.1527	0.0456	0.1634	1.4270	0.0127	0.0456	92.5392
3.6667	0.0833	85.6742	84.2580	7.0215	0.1488	0.0455	0.1667	1.3903	0.0124	0.0455	94.4001
3.7500	0.0833	89.8089	87.7415	7.3118	0.1549	0.0484	0.1815	1.4477	0.0129	0.0484	102.8221
3.8333	0.0833	79.3834	84.5961	7.0497	0.1494	0.0477	0.1829	1.3958	0.0124	0.0477	103.5911
3.9167	0.0833	70.6193	75.0013	6.2501	0.1324	0.0432	0.1693	1.2375	0.0110	0.0432	95.8784

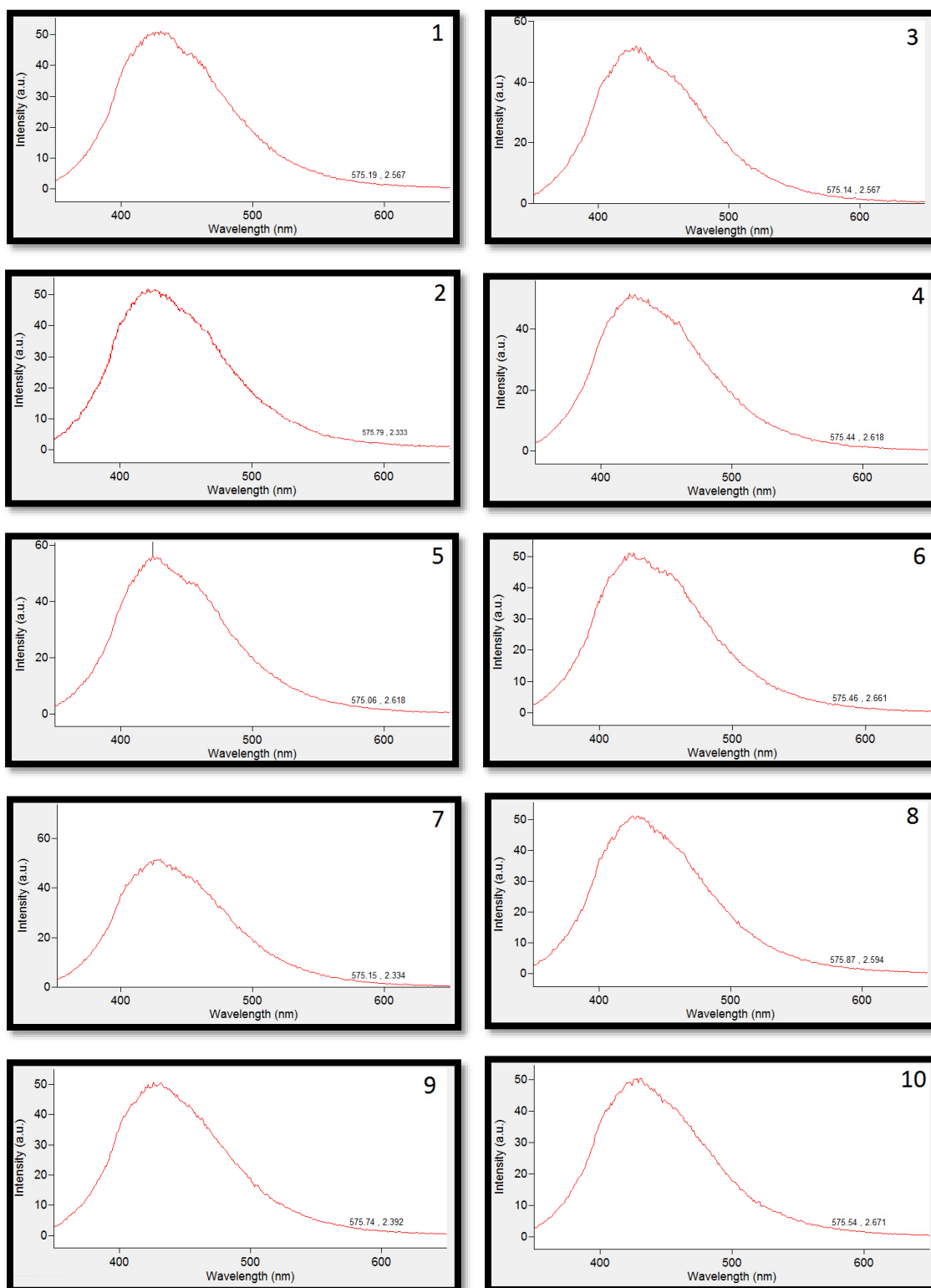
Continuación de la tabla A.1

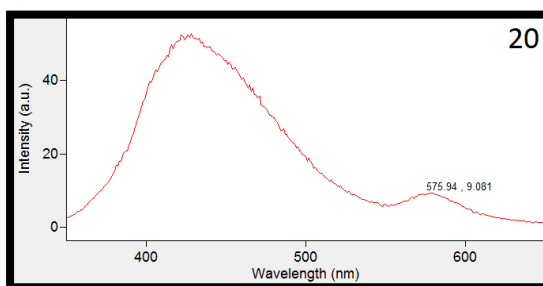
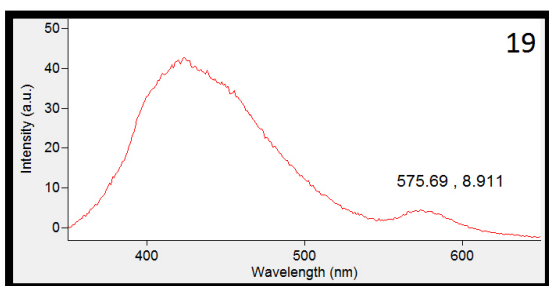
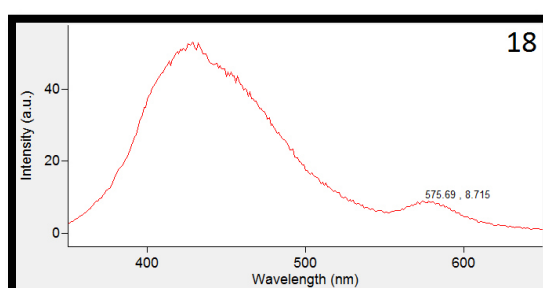
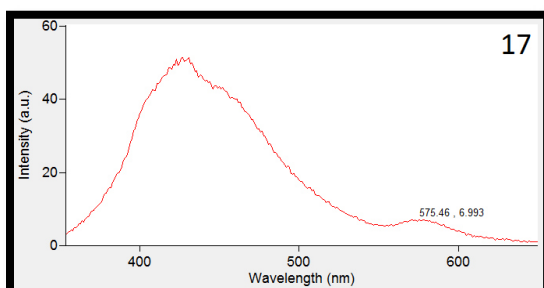
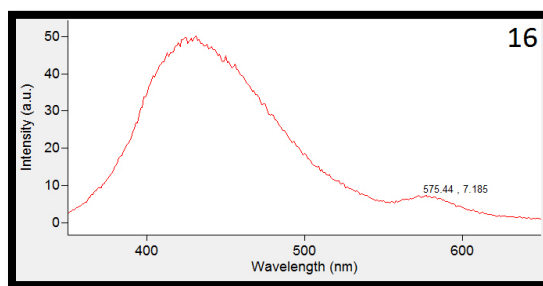
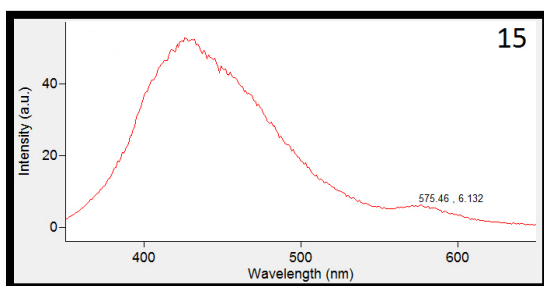
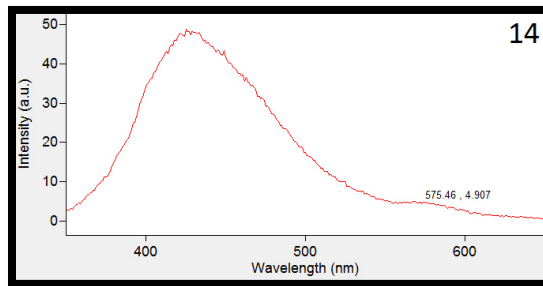
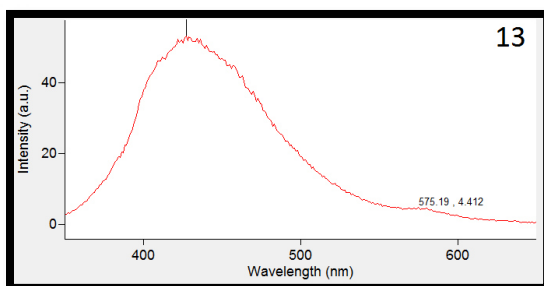
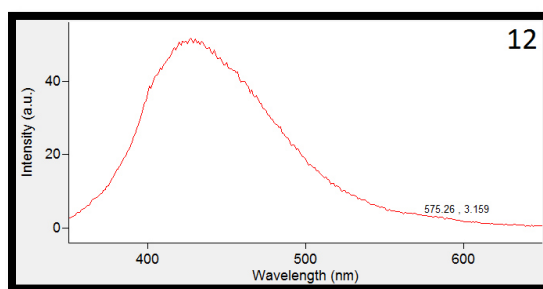
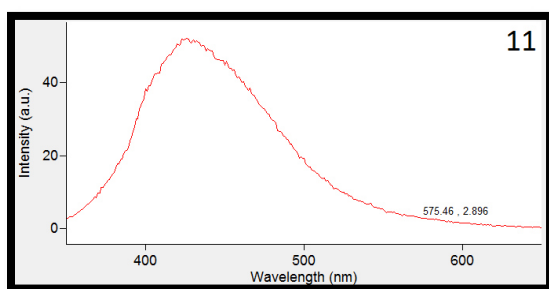
ANÁLISIS DE LA CURVA DE TRAZADOR EN EL CLARIFICADOR											
t	dt	C(t)	Ave C	C(t)*dt	E(t)	tE*dt	t^2E*dt	Q*c*dt	E(t)*dt	t*E(t)*dt	t^2C(t)*dt
4.0000	0.0833	69.0175	69.8184	5.8182	0.1233	0.0411	0.1644	1.1520	0.0103	0.0411	93.0912
4.1667	0.1667	74.2688	71.6431	11.9405	0.1265	0.0878	0.3660	2.3642	0.0211	0.0878	207.3008
4.3333	0.1667	68.4610	71.3649	11.8942	0.1260	0.0910	0.3943	2.3550	0.0210	0.0910	223.3457
4.5000	0.1667	53.9681	61.2145	10.2024	0.1081	0.0811	0.3648	2.0201	0.0180	0.0811	206.5991
4.6667	0.1667	61.3812	57.6746	9.6124	0.1018	0.0792	0.3696	1.9033	0.0170	0.0792	209.3376
4.8333	0.1667	56.2181	58.7997	9.7999	0.1038	0.0836	0.4042	1.9404	0.0173	0.0836	228.9375
5.0000	0.1667	54.0409	55.1295	9.1883	0.0973	0.0811	0.4056	1.8193	0.0162	0.0811	229.7064
5.1667	0.1667	47.9514	50.9962	8.4994	0.0900	0.0775	0.4006	1.6829	0.0150	0.0775	226.8857
5.3333	0.1667	43.4111	45.6813	7.6135	0.0807	0.0717	0.3824	1.5075	0.0134	0.0717	216.5631
5.5000	0.1667	34.9301	39.1706	6.5284	0.0692	0.0634	0.3487	1.2926	0.0115	0.0634	197.4852
5.6667	0.1667	33.0088	33.9694	5.6616	0.0600	0.0566	0.3210	1.1210	0.0100	0.0566	181.7994
5.8333	0.1667	33.7186	33.3637	5.5606	0.0589	0.0573	0.3341	1.1010	0.0098	0.0573	189.2153
6.0000	0.1667	31.0771	32.3978	5.3996	0.0572	0.0572	0.3432	1.0691	0.0095	0.0572	194.3870
6.1667	0.1667	26.0262	28.5517	4.7586	0.0504	0.0518	0.3195	0.9422	0.0084	0.0518	180.9594
6.3333	0.1667	25.7499	25.8881	4.3147	0.0457	0.0482	0.3056	0.8543	0.0076	0.0482	173.0665
6.5000	0.1667	26.5813	26.1656	4.3609	0.0462	0.0500	0.3253	0.8635	0.0077	0.0500	184.2492
6.6667	0.1667	20.1112	23.3462	3.8910	0.0412	0.0458	0.3053	0.7704	0.0069	0.0458	172.9349
6.8333	0.1667	17.0996	18.6054	3.1009	0.0328	0.0374	0.2556	0.6140	0.0055	0.0374	144.7949
7.0000	0.1667	19.3501	18.2249	3.0375	0.0322	0.0375	0.2628	0.6014	0.0054	0.0375	148.8366
7.2500	0.2500	18.7214	19.0357	4.7589	0.0336	0.0609	0.4416	0.9423	0.0084	0.0609	250.1416
7.5000	0.2500	20.6007	19.6611	4.9153	0.0347	0.0651	0.4882	0.9732	0.0087	0.0651	276.4835
7.7500	0.2500	17.8740	19.2374	4.8093	0.0340	0.0658	0.5100	0.9523	0.0085	0.0658	288.8614
8.0000	0.2500	18.5378	18.2059	4.5515	0.0321	0.0643	0.5143	0.9012	0.0080	0.0643	291.2947
8.2500	0.2500	13.7821	16.1599	4.0400	0.0285	0.0588	0.4855	0.7999	0.0071	0.0588	274.9715
8.5000	0.2500	16.6132	15.1977	3.7994	0.0268	0.0570	0.4847	0.7523	0.0067	0.0570	274.5076
8.7500	0.2500	17.5834	17.0983	4.2746	0.0302	0.0660	0.5778	0.8464	0.0075	0.0660	327.2721
9.0000	0.2500	16.3165	16.9499	4.2375	0.0299	0.0673	0.6060	0.8390	0.0075	0.0673	343.2365
9.2500	0.2500	12.5979	14.4572	3.6143	0.0255	0.0590	0.5460	0.7156	0.0064	0.0590	309.2493
9.5000	0.2500	14.2126	13.4053	3.3513	0.0237	0.0562	0.5340	0.6636	0.0059	0.0562	302.4565
9.7500	0.2500	16.6377	15.4251	3.8563	0.0272	0.0664	0.6472	0.7635	0.0068	0.0664	366.5879
10.0000	0.2500	16.6969	16.6673	4.1668	0.0294	0.0736	0.7357	0.8250	0.0074	0.0736	416.6819
10.5000	0.5000	12.3479	14.5224	7.2612	0.0256	0.1346	1.4134	1.4377	0.0128	0.1346	800.5473
11.0000	0.5000	12.6508	12.4993	6.2497	0.0221	0.1214	1.3352	1.2374	0.0110	0.1214	756.2103
11.5000	0.5000	14.2108	13.4308	6.7154	0.0237	0.1364	1.5680	1.3297	0.0119	0.1364	888.1128
12.0000	0.5000	12.3406	13.2757	6.6379	0.0234	0.1406	1.6876	1.3143	0.0117	0.1406	955.8507
13.0000	1.0000	11.6733	12.0070	12.0070	0.0212	0.2756	3.5827	2.3774	0.0212	0.2756	2,029.1750
14.0000	1.0000	10.0957	10.8845	10.8845	0.0192	0.2690	3.7667	2.1551	0.0192	0.2690	2,133.3663
15.0000	1.0000	7.5818	8.8388	8.8388	0.0156	0.2341	3.5113	1.7501	0.0156	0.2341	1,988.7196
16.0000	1.0000	8.1021	7.8419	7.8419	0.0138	0.2215	3.5445	1.5527	0.0138	0.2215	2,007.5388
17.0000	1.0000	5.1599	6.6310	6.6310	0.0117	0.1990	3.3835	1.3129	0.0117	0.1990	1,916.3509
18.0000	1.0000	7.1442	6.1520	6.1520	0.0109	0.1955	3.5193	1.2181	0.0109	0.1955	1,993.2484
19.0000	1.0000	8.4223	7.7832	7.7832	0.0137	0.2611	4.9609	1.5411	0.0137	0.2611	2,809.7452
20.0000	1.0000	9.8099	9.1161	9.1161	0.0161	0.3219	6.4381	1.8050	0.0161	0.3219	3,646.4381
21.0000	1.0000	7.5562	8.6830	8.6830	0.0153	0.3219	6.7608	1.7192	0.0153	0.3219	3,829.2110
22.0000	1.0000	6.1227	6.8394	6.8394	0.0121	0.2657	5.8446	1.3542	0.0121	0.2657	3,310.2821
23.0000	1.0000	6.8257	6.4742	6.4742	0.0114	0.2629	6.0469	1.2819	0.0114	0.2629	3,424.8600
24.0000	1.0000	3.6909	5.2583	5.2583	0.0093	0.2228	5.3476	1.0411	0.0093	0.2228	3,028.7995
Σ	24.0000		4,311.1387	566.3811	7.6117	6.7205	78.9393	112.1435	1.0000	6.7205	44,709.7004

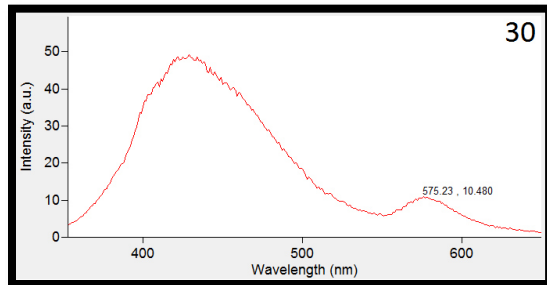
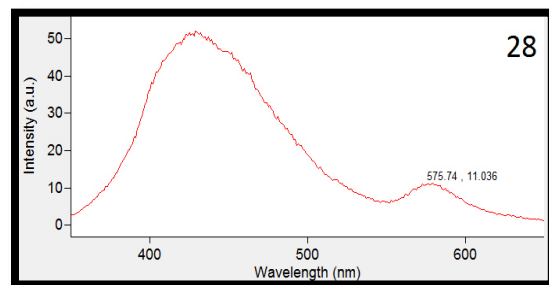
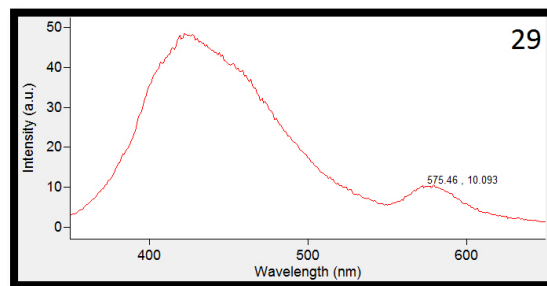
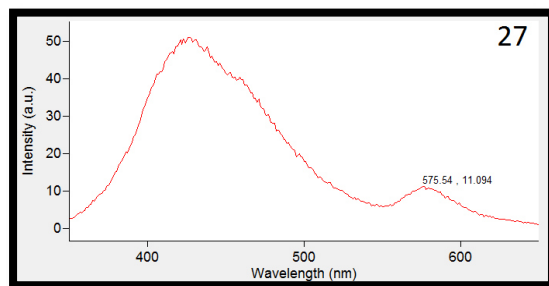
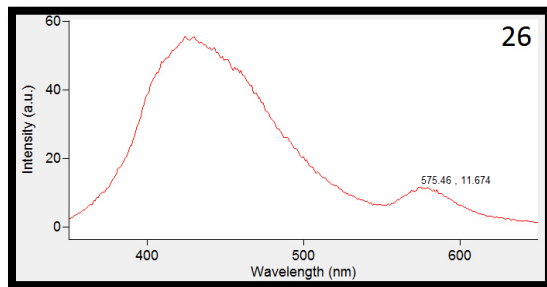
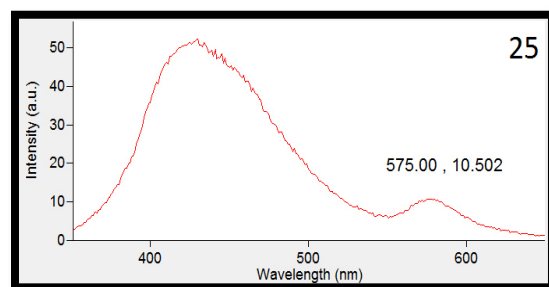
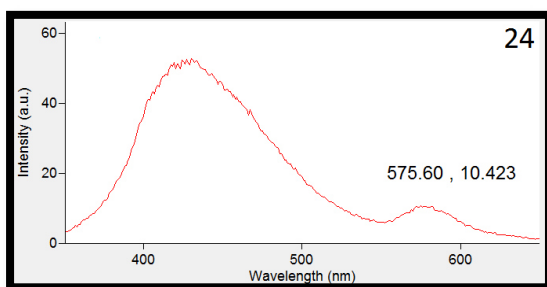
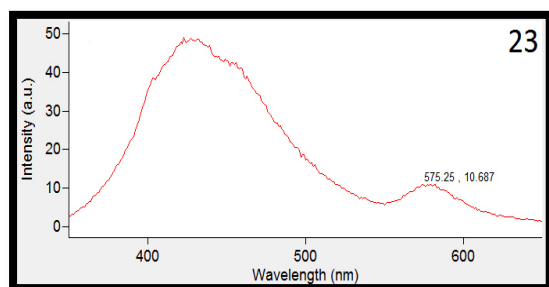
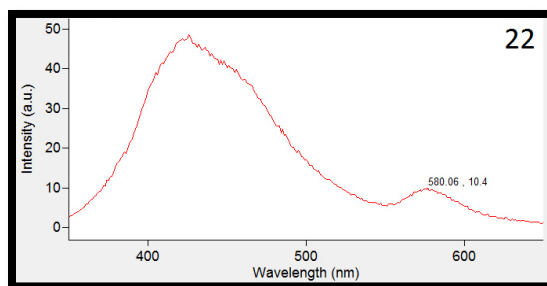
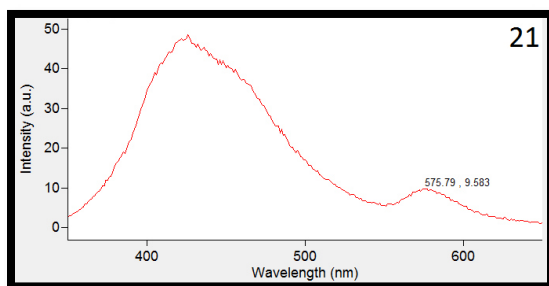


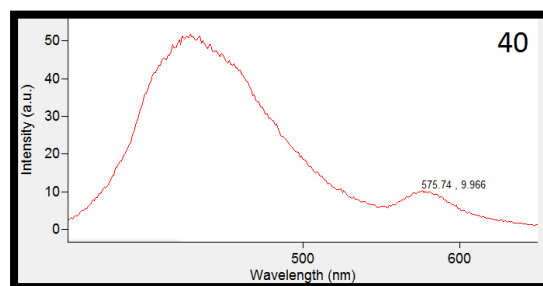
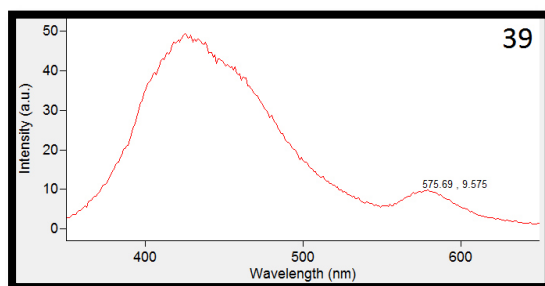
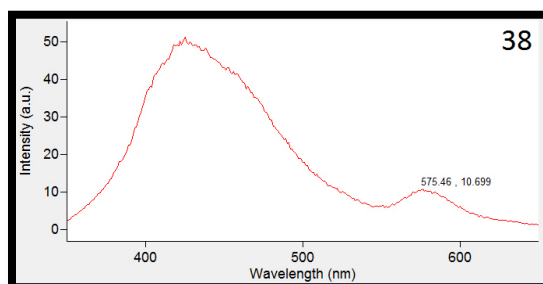
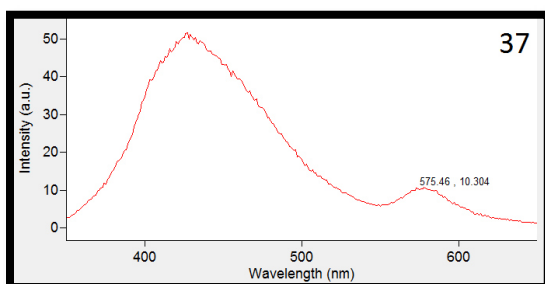
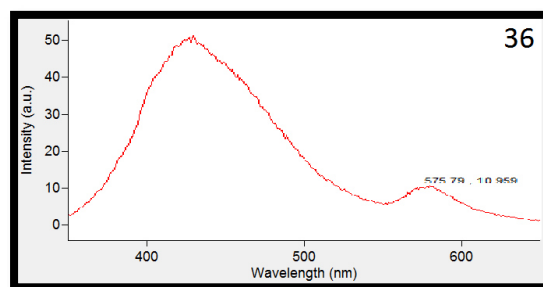
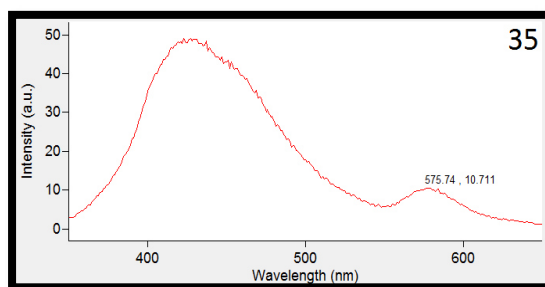
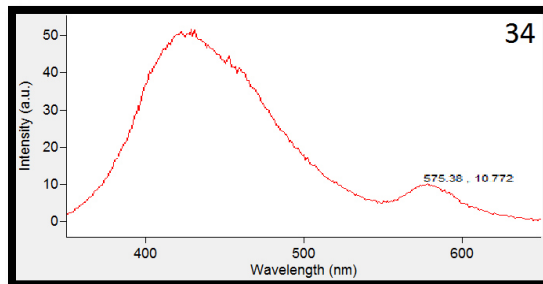
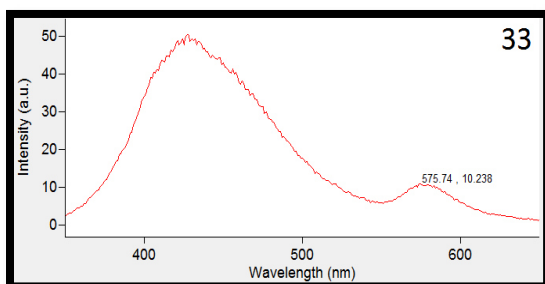
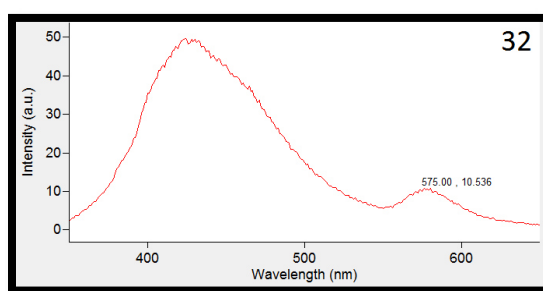
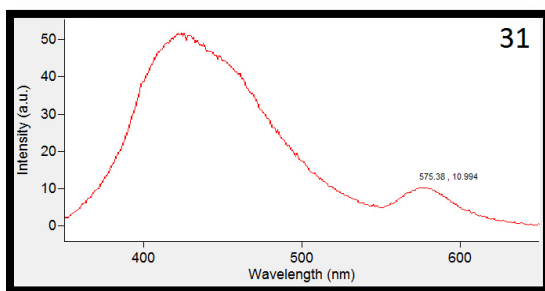
Figura A.1 Imagen satelital de la PTAR Zuazua, la cual al compararla con la imagen 3.5 se observa la implementación de otro tren de tratamiento (Imagen generada con Google Earth Pro)

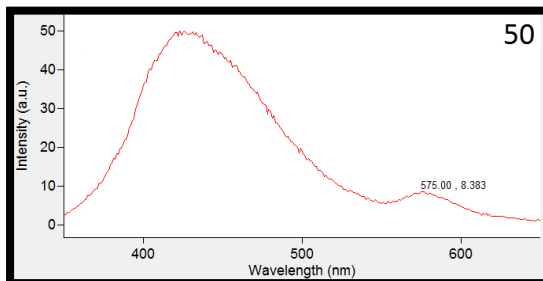
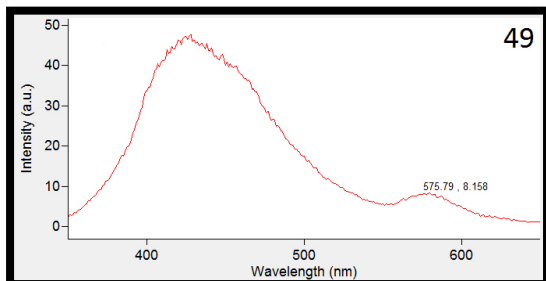
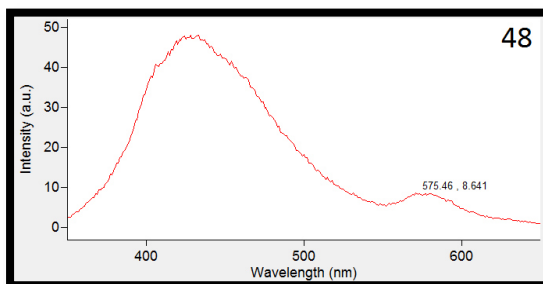
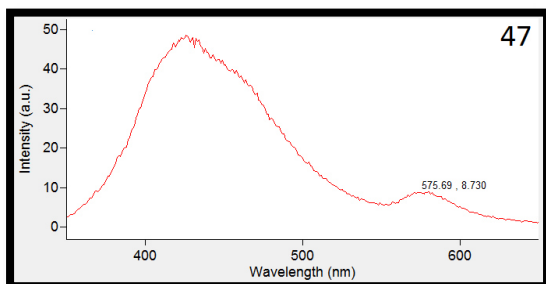
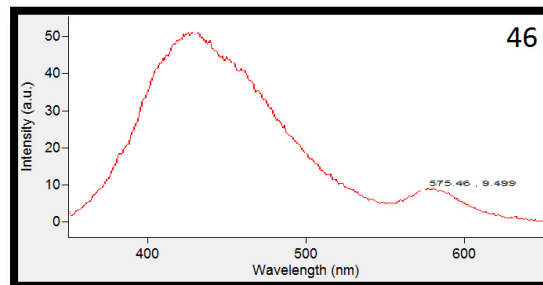
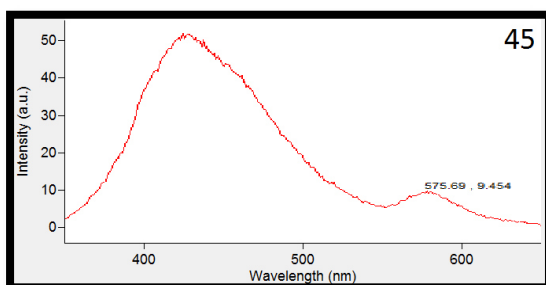
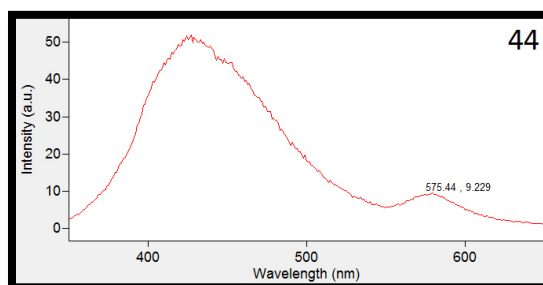
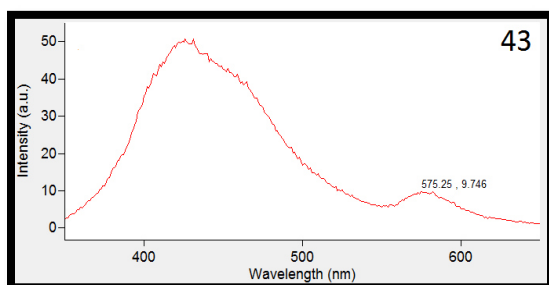
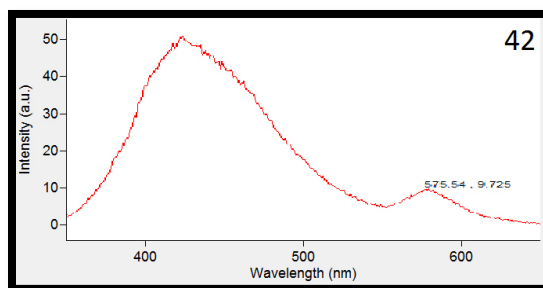
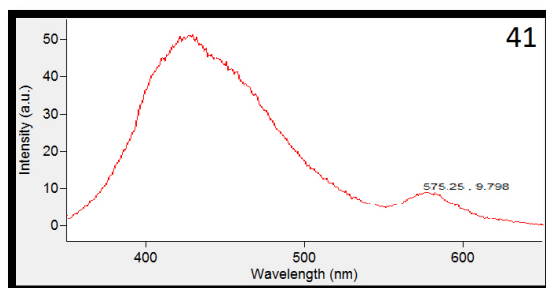
Figura A.2-A.96 Resultados gráficos de los análisis a las 95 muestras recolectadas en la experimentación.

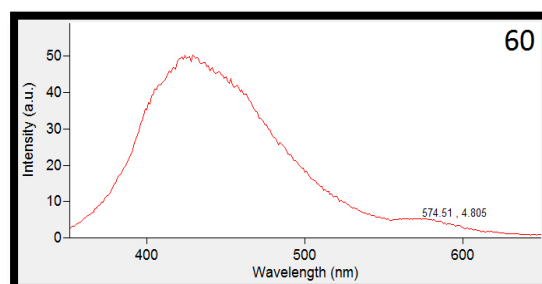
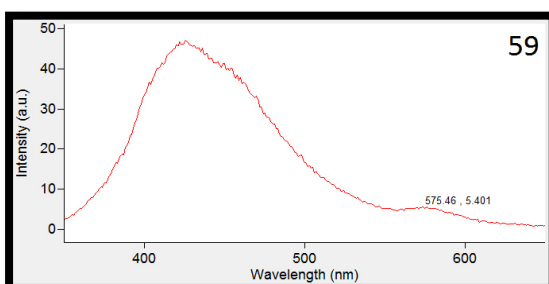
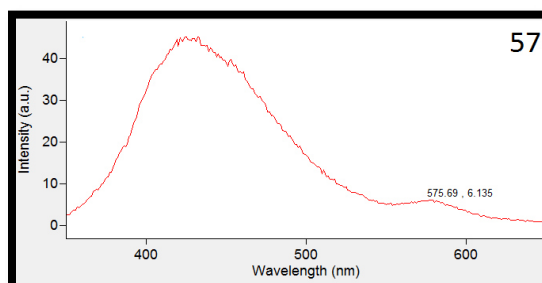
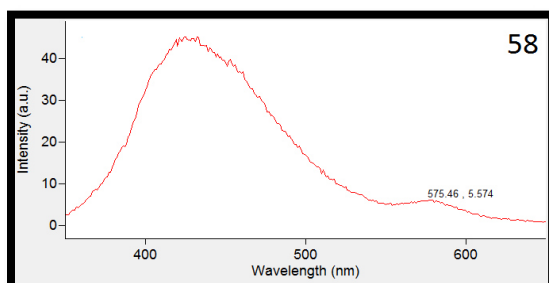
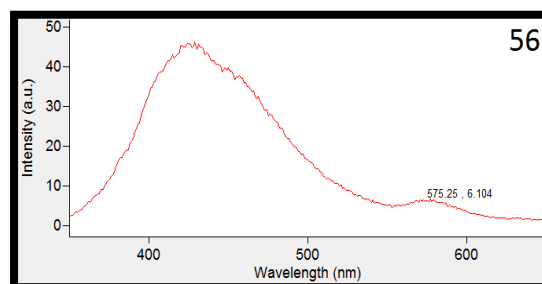
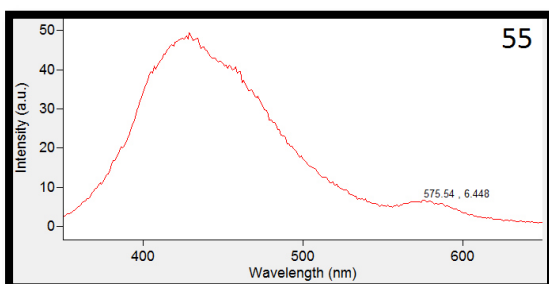
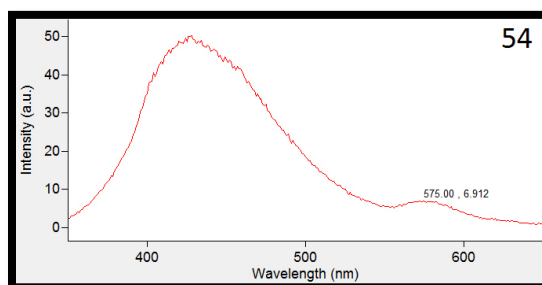
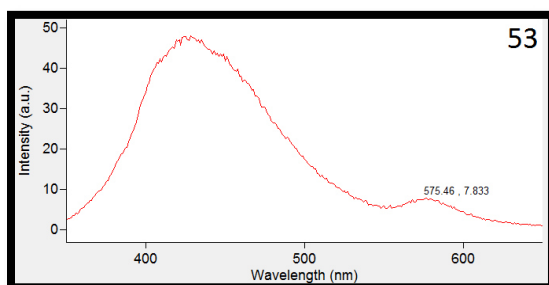
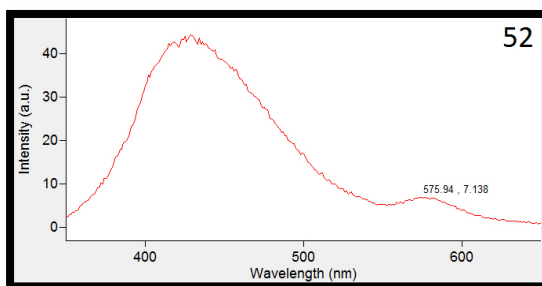
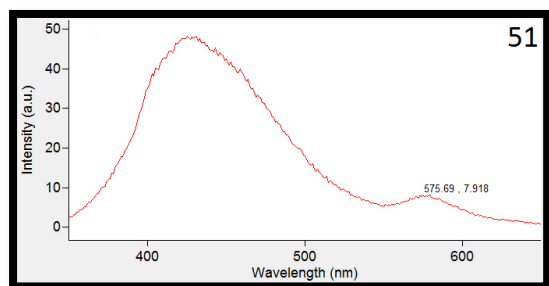


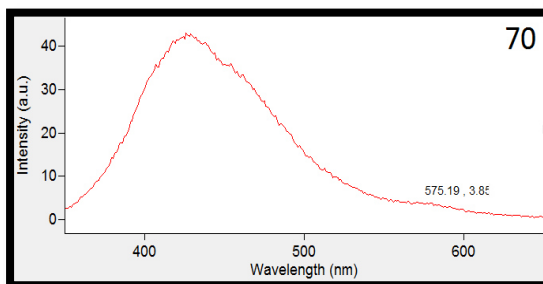
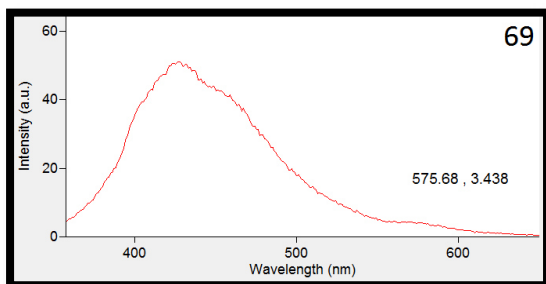
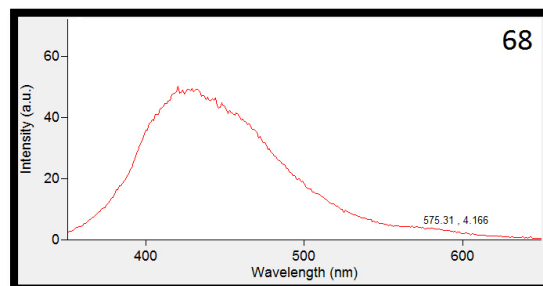
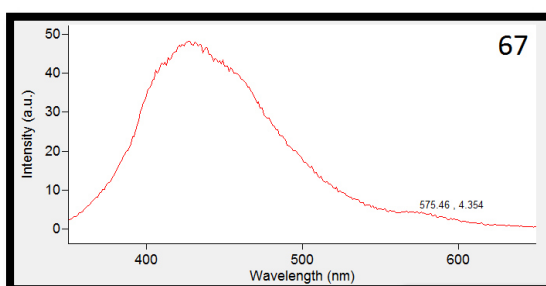
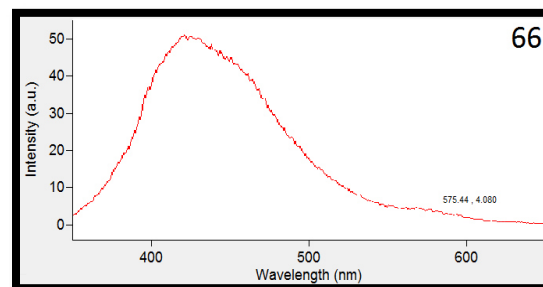
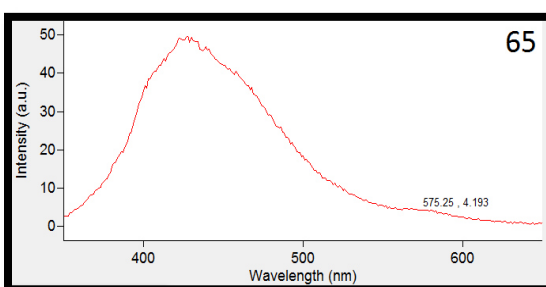
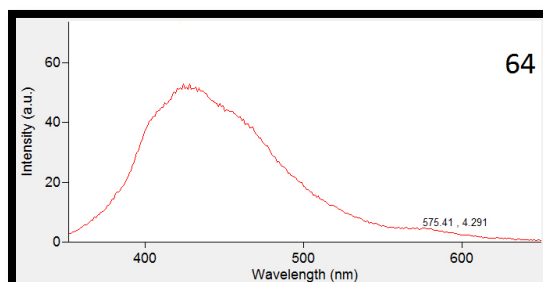
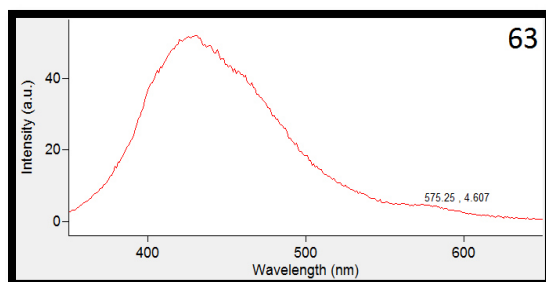
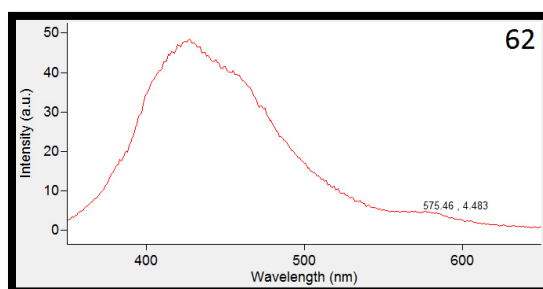
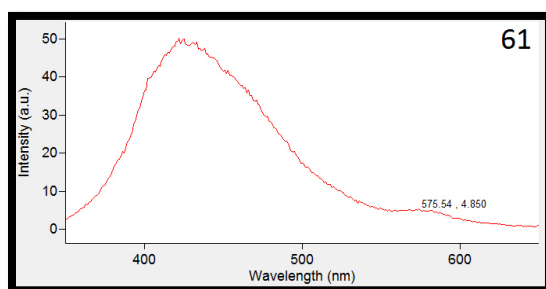


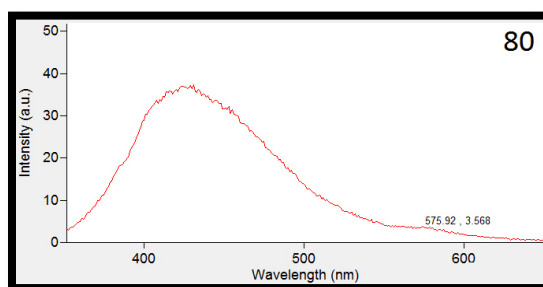
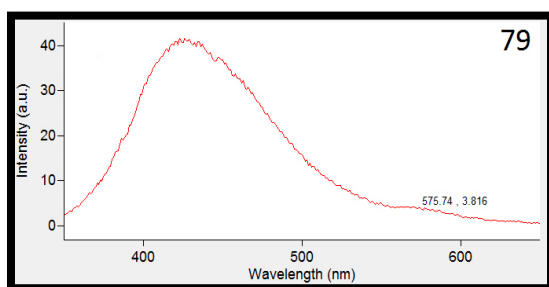
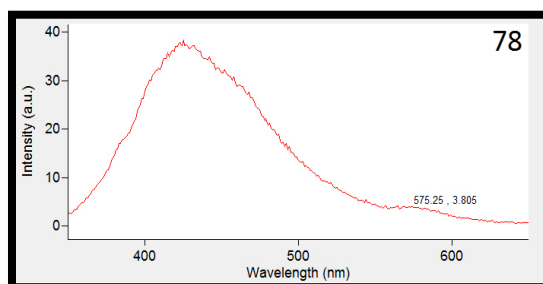
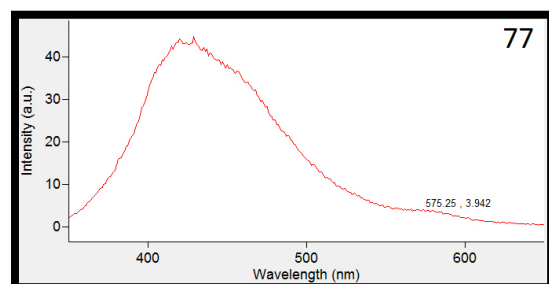
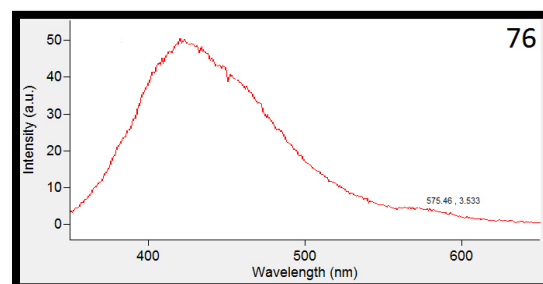
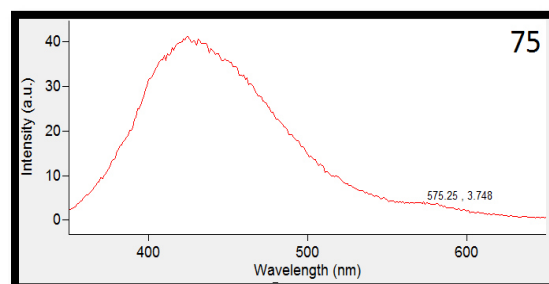
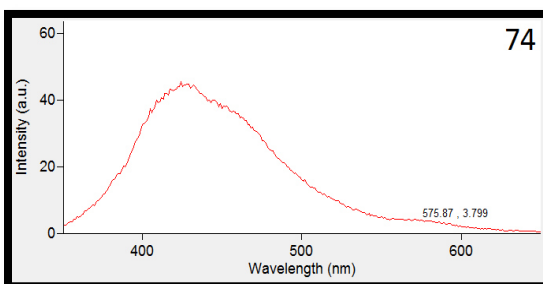
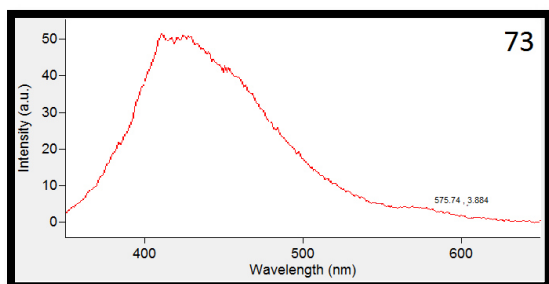
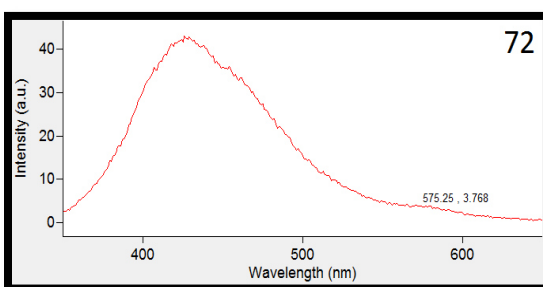
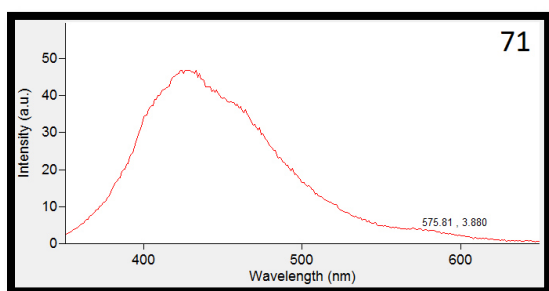


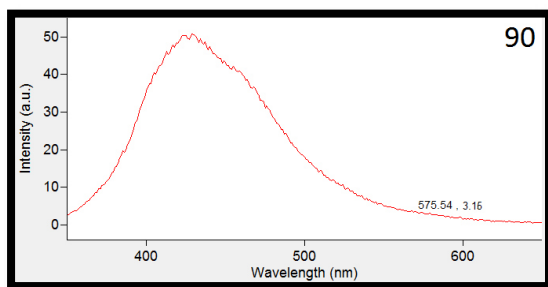
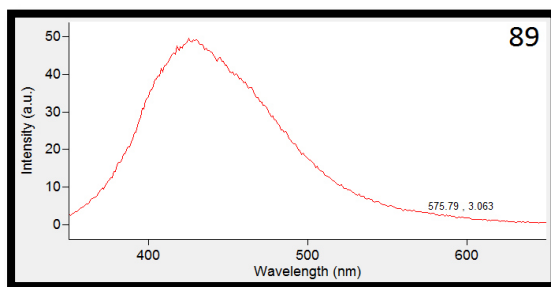
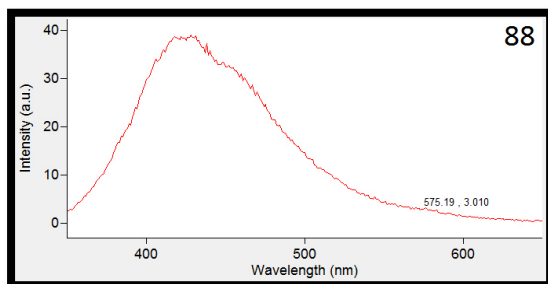
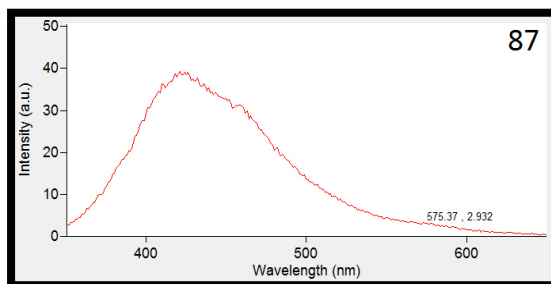
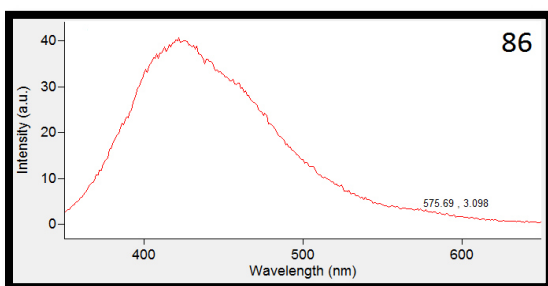
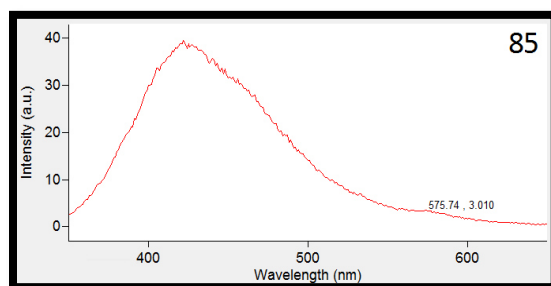
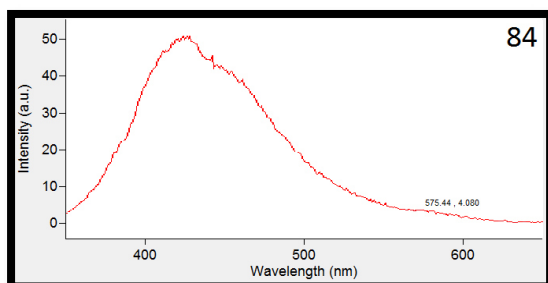
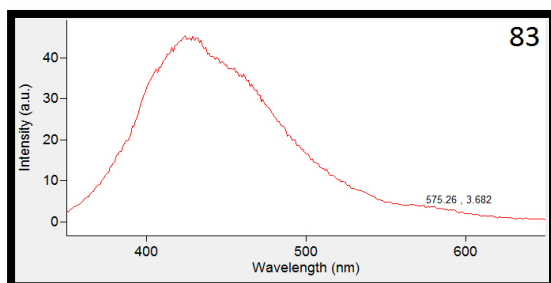
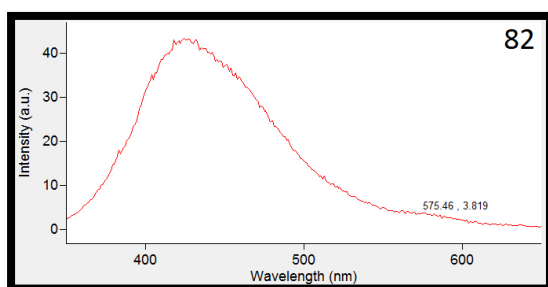
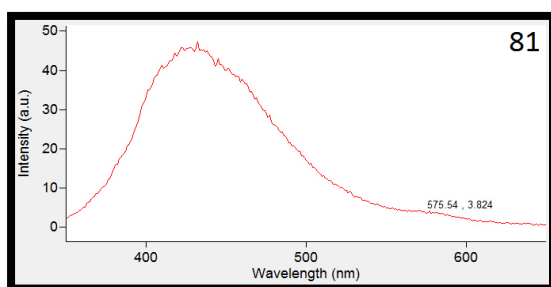


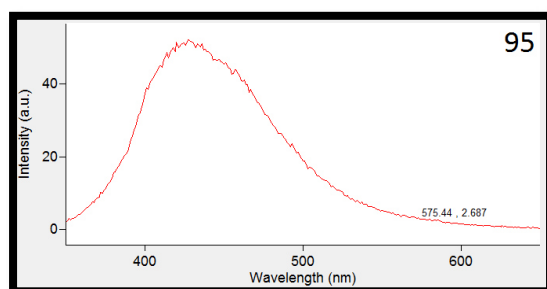
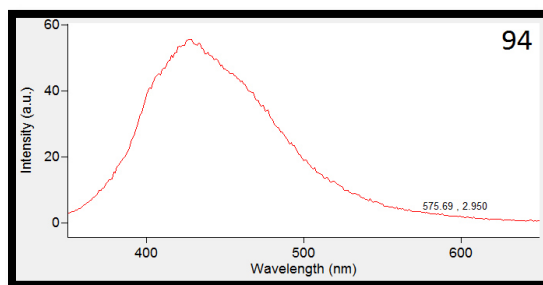
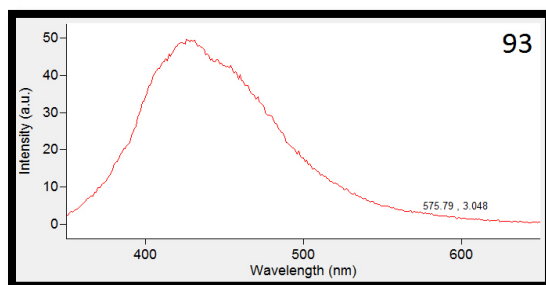
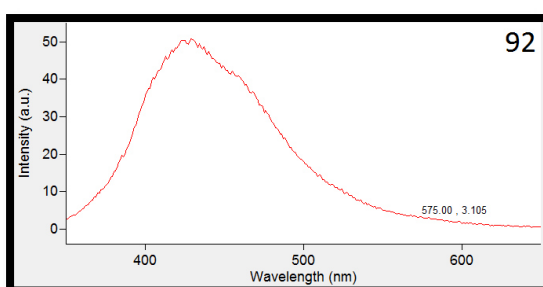
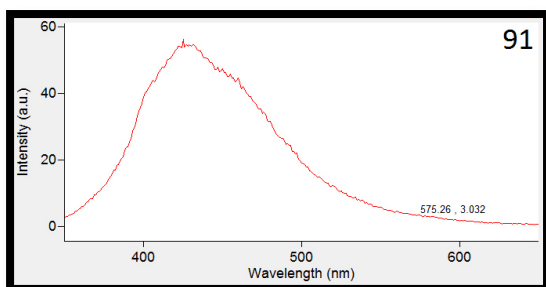












RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Omar Antonio Cardiel Vázquez

Candidato para el Grado de
Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental

Tesis: CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DE UN CLARIFICADOR SECUNDARIO

Campo de estudio: Ambiental

Biografía:

Nacido en Monterrey, Nuevo León el 1 de agosto de 1991, hijo de José Antonio Cardiel Macías y San Juana Laura Vázquez Barrón.

Educación:

Ingeniero Civil.
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Agosto 2008 – Julio 2013

Contacto:

Móvil: 811-5090-735
Correo electrónico: omar_1oa@hotmail.com